

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN SISTEM
MEMPERTIMBANGKAN *ENERGY STORAGE***

Yoanes Bagus Nugraha Wigaswara
NRP 2213100085

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN
SISTEM MEMPETIMBANGKAN *ENERGY STORAGE***

Yoanes Bagus Nugraha Wigaswara
NRP 2213100085

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW
CONSIDERING ENERGY STORAGE**

Yoanes Bagus Nugraha Wigaswara
NRP 2213100085

Supervisor
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Aliran Daya Optimal dengan Batas Kemaanan Sistem Mempertimbangkan *Energy Storage***” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

Yoanes Bagus Nugraha W.
NRP 2213100085

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN
SISTEM MEMPERTIMBANGKAN *ENERGY STORAGE***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.

NIP: 197411292000121001

NIP: 198109052005011002

**SURABAYA
JULI, 2017**

ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN SISTEM MEMPERTIMBANGKAN ENERGY STORAGE

Nama Mahasiswa : Yoanes Bagus Nurgaha W.
NRP : 2213100085
Dosen Pembimbing 1 : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP : 19741129 200012 1 001
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.
NIP : 19810905 200501 1 002

ABSTRAK

Kebutuhan energi listrik adalah sebuah kebutuhan pokok yang harus terpenuhi. Untuk itu dibutuhkan perencanaan operasi sistem tenaga yang baik agar dapat memenuhi kebutuhan beban dengan tepat. Namun, dalam sebuah pengoperasian sistem tenaga listrik tidak dapat terlepas dari sebuah gangguan yang mengakibatkan kegagalan operasi pada sistem. *Security Constrained Optimal Power Flow* digunakan untuk melakukan perencanaan pembangkitan dengan mempertimbangkan batasan keamanan sistem berupa kontingensi pada saluran di sistem tenaga. Metode *quadratic programming* digunakan untuk menyelesaikan optimasi tersebut. Kontingensi dapat terjadi pada waktu tertentu dalam suatu rentang waktu operasi dalam sehari. Adanya pertimbangan kondisi kontingensi pada sistem menghasilkan pembangkitan yang berbeda dan biaya pembangkitan yang lebih mahal hingga 0.4% akibat adanya penyesuaian pembangkitan untuk memastikan *dispatch* ulang yang terjadi dapat memenuhi batasan operasi pada kondisi kontingensi. Ketika terjadi kontingensi *re-dispatch* dilakukan untuk memenuhi perubahan batasan operasi yang ada, hal inilah yang menyebabkan dibutuhkan penyesuaian pembangkitan agar *re-dispatch* tidak melanggar batasan *ramp rate* dan juga kapasitas saluran. Penambahan *energy storage* ke sistem mempengaruhi pembangkitan selama rentang waktu operasi. Dengan adanya *energy storage* pada sistem dapat mengurangi biaya operasi pada sistem hingga 1.6% dan membantu *ramp rate* pembangkit dalam memenuhi batasan operasi kondisi kontingensi, serta menurunkan aliran daya saluran yang mengalami kontingensi hingga 1.2%.

Kata kunci: *security constraint*, DCOPF, *energy storage*, *quadratic programming*

Halaman ini sengaja dikosongkan

SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW CONSIDERING ENERGY STORAGE

Student Name : Yoanes Bagus Nurgaha W.
NRP : 2213100085
Supervisor 1 : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP : 19741129 200012 1 001
Supervisor 2 : Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT.
NIP : 19810905 200501 1 002

ABSTRACT

The need of electricity is a basic need that must be met. For that, the good operation planning of power system is required to statisfied the load needed with a minimal price. However, in an operation of power system, it can't be separated from a disturbance that leads to contingency which requires to outage the generator or the transmission line on the system. Security Constrained Optimal Power Flow is introduced to peform the operation planning of generation by considering the system security in the form of contingency on the line transmission in power system. Quadratic programming method is used to complete the optimization. Contingency can occur at specific time during the operation time in a day. Considering contingency can affect the generation and operation cost, the cost can be higher to 0.4% than the generation cost without considering contingency. When contingency occurs, generator must perform a re-dispatch to ensure all constraints satisfied, because of that it's require generated adjustment to ensure, that re-dispatch doesn't violate the ramp rate and line capacity. The addition of energy storage to the system effect the dispatch of the generator during the operation time. With the energy storage in the system can reduce the operating cost on the system up to 1.6% and help the ramp rate of the plant in meeting the contingency condition operating limits, as well as reduce the power flow of line in contingency up to 1.2%.

Key words: security constraint, DCOPF, energy storage, quadratic programming

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala cinta dan kasih sayang yang telah diberikan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian ini sebagai tugas akhir untuk menyelesaikan jenjang studi S1 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, khususnya mahasiswa Teknik Elektro.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini penulis mengucapkan terimakasih atas segala bantuan, bimbingan, dan dukungan yang telah diberikan, kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang tanpa bantuan-Nya penulis tidak mungkin bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua saya tercinta, Bapak Kusno dan Ibu Yiga serta kakak saya Prista atas doa, dukungan dan nasihat selama saya menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Dr. Rony Seto Wibowo ST., MT., selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir dan Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir yang telah memberikan arahan, saran serta bimbingan selama pengerjaan tugas akhir dan selama perkuliahan di Teknik Elektro.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS, yang telah memberikan ilmu dan inspirasi selama perkuliahan.
5. Prof. Seno, Prof. Adi, Pak Rony, Bu Aryani, Pak Umen, Pak Yanto, atas segala bimbingan ilmu, cerita dan inspirasinya selama saya menjadi asisten di PSSSL
6. Teman teman E53, atas segala suka dan duka, kenangan dan ceritanya.
7. Fiona, Indra, Tufi, Habibur, Febri, Icha, Mas Aji, Mbah Gilang, dan Mbah Dinda, dan juga adik-adik trainee 2014 dan 2015 di keluarga besar PSSSL atas semua kerja sama, cerita dan perhatiannya.
8. Fiona yang selalu mengingatkan, dan memberi semangat dalam pengerjaan Tugas Akhir, serta Mbak Dini atas segala dukungan dan bimbingan ilmu yang luar biasa dalam membantu saya menyelesaikan Tugas Akhir ini.

9. Galih, Hilmy sebagai patner belajar dan bimbingan yang mendorong untuk berusaha mengerjakan lebih baik.

10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, dengan tanpa mengurangi rasa terimakasih penulis.

Dalam menyusun tugas akhir ini, penulis menyadari masih banyak kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, kritik, saran maupun diskusi sangat diharapkan penulis untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 4 Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi Tugas Akhir	3
1.6 Sistematika Laporan	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN SISTEM MEMPERTIMBANGKAN ENERGY STORAGE	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.2 Batas Keamanan Sistem	8
2.3 DC Power Flow	10
2.4 Optimal Power Flow (OPF) Arus Searah	11
2.4.1 Pemodelan Matematis Permasalahan OPF Arus Searah	11
2.5 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) Arus Searah	13
2.5.1 Pemodelan Matematis Permasalahan Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) Arus Searah	14
2.6 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) Arus Searah dengan Batas Keamanan Sistem	15
2.7 <i>Energy Storage</i>	16
BAB 3 QUADRATIC PROGRAMMING DALAM ALIRAN DAYA OPTIMAL ARUS SEARAH MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN SISTEM DENGAN ENERGY STORAGE	19

3.1	Algoritma.....	19
3.2	Quadratic Programming pada Matlab.....	21
3.3	Penerapan Quadratic Programming pada Aliran Daya Optimal Dinamis.....	23
3.3.1	Inisialisasi Fungsi Objektif dan Constraints	23
3.3.2	Aliran Daya Optimal Dinamis Pada Quadratic Programming	25
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS.....		31
4.1	Analisis Kontingensi.....	31
4.1.1	Analisa Kontingensi Sistem 9 Bus	31
4.1.2	Analisa Kontingensi Sistem 30 Bus	32
4.2	Simulasi Sistem 9 Bus	32
4.2.1	Validasi Tahap 1	35
4.2.2	Validasi Tahap 2.....	36
4.2.3	Validasi Tahap 3.....	38
4.2.4	Validasi Tahap 4.....	40
4.3	Sistem 30 Bus	43
4.3.1	Simulasi Sistem 30 Bus	47
4.3.2	Pengujian Pertama	48
4.3.3	Analisa Pengujian Pertama.....	52
4.3.4	Pengujian Kedua.....	54
4.3.5	Analisa Pengujian Kedia	57
BAB 5 PENUTUP		59
5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran	59
DAFTAR PUSTAKA.....		61
LAMPIRAN		63
RIWAYAT HIDUP PENULIS		73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Tenaga Listrik.....	7
Gambar 2.2	<i>Optimal Dispatch</i> Kondisi Normal.....	8
Gambar 2.3	<i>Post Contingency State</i>	9
Gambar 2.4	<i>Secure Dispatch</i>	9
Gambar 2.5	<i>Secure Post Contingency</i>	10
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> alur sistem keseluruhan.....	19
Gambar 3.2	Lanjutan <i>flowchart</i> alur sistem keseluruhan	20
Gambar 3.3	Sistem 3 Bus.	25
Gambar 3.4	Matrix A 1 Level beban.....	28
Gambar 3.5	Matrix A untuk Multi Level Beban	29
Gambar 4.1	Sistem 9 Bus.....	34
Gambar 4.2	Profil Beban Sistem 9 Bus.....	34
Gambar 4.3	Data Keluaran <i>Energy Storage</i> (1) Tiap Jam.....	41
Gambar 4.4	SOC <i>Energy Storage</i> (%)	41
Gambar 4.5	Daya Keluaran <i>Energy Storage</i> (2) Tiap Jam.....	42
Gambar 4.6	SOC (%) <i>Energy Storage</i> (2).....	42
Gambar 4.7	Sistem 30 Bus.....	45
Gambar 4.8	Profil Beban Sistem 30 Bus.....	48
Gambar 4.9	Daya Pembangkitan Kasus 1 OPF Tanpa <i>Energy Storage</i>	49
Gambar 4.10	Daya Pembangkitan Kasus 2 SCOPF tanpa <i>Energy Storage</i>	49
Gambar 4.11	Daya Pembangkitan Kasus 3 OPF dengan <i>Energy Storage</i>	50
Gambar 4.12	Daya Pembangkitan Kasus 4 SCOPF dengan <i>Energy Storage</i>	50
Gambar 4.13	Daya Keluaran <i>Energy Storage</i> (1)-(5) Tiap Jam Kasus 3	51
Gambar 4.14	Daya Keluaran <i>Energy Storage</i> (1)-(5) Tiap Jam Kasus 4	51

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Perbedaan Quadprog dengan Qps_matpower	22
Tabel 4.1 Daftar Dampak Kontingensi Sistem 9 Bus	31
Tabel 4.2 Daftar Dampak Kontingensi Sistem 30 Bus	32
Tabel 4.3 Data Bus Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus.....	33
Tabel 4.4 Data Pembangkitan Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus	33
Tabel 4.5 Data Saluran Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus.....	33
Tabel 4.6 Data 2 Level Beban Profile Beban Sistem 9 Bus	35
Tabel 4.7 Hasil Validasi Tahap 1	36
Tabel 4.8 Hasil Validasi Tahap 2.....	37
Tabel 4.9 Daya Pembangkitan Tanpa Batasan <i>Ramp Rate</i>	38
Tabel 4.10 Selisih Pembangkitan Tanpa Batasan <i>Ramp Rate</i>	39
Tabel 4.11 Daya Pembangkitan Dengan Batasan <i>Ramp Rate</i>	39
Tabel 4.12 Selisih Pembangkitan Dengan Batasan <i>Ramp Rate</i>	39
Tabel 4.13 Data <i>Energy Storage</i> (1)	40
Tabel 4.14 Data <i>Energy Storage</i> (2)	40
Tabel 4.15 Data Unit Pembangkit Sistem 30 Bus	44
Tabel 4.16 Data Energy Storage Pada Sistem 30 Bus.....	44
Tabel 4.17 Data Beban Sistem 30 Bus.....	46
Tabel 4.18 Data Saluran Sistem 30 Bus.....	47
Tabel 4.19 Perbedaan Daya Keluaran Kasus 3 dan Kasus 4.....	52
Tabel 4.20 Data Biaya Pembangkitan Pengujian Pertama	52
Tabel 4.21 Daya Pembangkitan Pengujian Kedua Kondisi <i>On Peak</i> ... 55	
Tabel 4.22 Aliran Daya Saluran Kondisi Kontingensi (1)	55
Tabel 4.23 Aliran Daya Saluran Kondisi Kontingensi (2)	56
Tabel 4.24 Aliran Daya Saluran Kondisi Kontingensi (3)	57

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi listrik terus meningkat dan menjadi sebuah kebutuhan pokok yang harus terpenuhi. Dalam proses pemenuhan kebutuhan beban tidak dapat terlepas dari proses penyaluran seperti saluran transmisi ataupun distribusi, sehingga hal tersebut harus ikut diperhatikan dalam proses perencanaan. Kondisi kapasitas saluran merupakan salah satu hal yang harus diperhatikan agar tidak terjadi overload pada saluran yang dapat merusak saluran tersebut. Dalam operasi sistem tenaga listrik ada beberapa kriteria yang harus dipenuhi. Kriteria tersebut adalah *Security*, *Quality*, dan *Economy* [1]. *Security* atau keamanan adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk menghadapi kejadian yang tidak direncanakan seperti gangguan, tanpa mengakibatkan pemadaman listrik yang dapat merugikan konsumen. *Quality* atau kualitas adalah kemampuan sistem untuk beroperasi dengan semua batasan operasi terpenuhi seperti tegangan yang sesuai standard an pembangkitan yang sistem memenuhi kebutuhan beban. *Economy* atau ekonomi adalah suatu optimasi sistem tenaga listrik agar didapatkan biaya minimum tanpa melanggar batasan kualitas dan keamanan.

Optimasi sistem tenaga dalam hal ekonomi *OPF* atau *Optimal Power Flow* dapat digunakan. *Optimal Power Flow (OPF)* merupakan bentuk pengembangan dari *economic dispatch* dengan mempertimbangkan aliran daya pada saluran transmisi. *OPF* berfungsi untuk mengatur pembebanan pembangkit pada suatu sistem kelistrikan yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batasan-batasan operasi [2]. Batasan-batasan operasi tersebut dapat berupa fungsi non-linear biaya pembangkitan generator, daya maksimum dan minimum pembangkit, ramp rate pembangkit, kapasitas saluran, dan lain sebagainya. Namun, *OPF* konvensional belum mampu mengatasi pembebanan pembangkit dengan beban yang dinamis karena terdapat pembangkitan yang melanggar batasan operasi *ramp rate* pembangkit [3]. Untuk masalah tersebut harus ada penambahan batasan pada *OPF* agar dapat digunakan untuk menyelesaikannya.

Dalam suatu sistem kelistrikan tidak dapat terlepas dari namanya sebuah gangguan. Gangguan dapat terjadi pada unit pembangkit dan

saluran transmisi. Gangguan tersebut dapat berupa gangguan seperti lepasnya pembangkit, hubung singkat (*short circuit*) atau terjadinya kontingensi saluran. Untuk menjaga keandalan sistem dari gangguan tersebut, diperlukan perencanaan pembangkitan yang tepat saat terjadi gangguan. Perencanaan dengan OPF belum bisa mengatasi sistem yang terdapat gangguan, untuk itu diperlukan pengembangan dari OPF dengan penambahan batas keamanan sistem.

Aliran daya optimal DC dengan mempertimbangkan batasan keamanan sistem merupakan pengembangan dari Optimal Power Flow dengan memperhitungkan adanya kontingensi pada saluran transmisi dan juga ramp rate dari unit pembangkit. Fungsi utama OPF dengan mempertimbangkan batasan keamanan sistem dapat memperhitungkan adanya kontingensi yang terjadi pada saluran transmisi dan memastikan sistem tetap dapat memenuhi kebutuhan beban dengan memperhatikan batasan-batasan keamanan pada sistem tenaga [4]. Dalam OPF dengan mempertimbangkan batasan keamanan sistem, analisis kontingensi digabungkan dengan aliran daya optimal diikuti dengan melakukan beberapa penyesuaian, sehingga tidak ada pelanggaran saat terjadi gangguan. *Energy Storage* adalah salah satu alat yang digunakan untuk menyimpan suatu energy. Baterai adalah salah contoh dari *energy storage*. Baterai sudah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi dalam sistem tenaga listrik. Baterai *energy storage* digunakan dalam membantu pengaturan beban dan memotong beban puncak [5]. Dalam hal ini, *energy storage* digunakan untuk membantu sistem dalam mengatasi dampak kontingensi pada saluran transmisi dari sisi biaya. Perencanaan sistem OPF dengan mempertimbangkan keamanan sistem saat terjadi kontingensi cenderung menghasilkan biaya yang lebih besar, karena dilakukannya dispatch ulang untuk menyesuaikan perubahan saluran, untuk itu *energy storage* yang terdistribusi digunakan dalam membantu meminimalkan hal tersebut, sehingga biaya yang dibutuhkan akibat adanya kontingensi dapat menjadi lebih murah.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang didapatkan permasalahan dalam perencanaan suatu sistem tenaga listrik, yaitu mencari perencanaan pembebanan pembangkit yang paling optimal dalam memenuhi kebutuhan beban. Dalam membuat perencanaan sistem tenaga listrik yang baik kebutuhan beban bukan hanya batasan yang harus diperhatikan, tetapi juga *ramp rate* dari pembangkit, kapasitas saluran,

dan juga kontingensi yang terjadi agar mendapatkan sistem tenaga listrik yang berkualitas, ekonomis dan juga aman. Selain itu, penting untuk mengetahui pengaruh dari adanya *energy storage* yang terdistribusi terhadap sistem dan dalam membantu mengatasi dampak biaya dari kontingensi dalam perencanaan sistem tenaga listrik.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan perencanaan sistem tenaga listrik yang berkualitas, ekonomis dan aman, yang memenuhi semua batasan operasi seperti kebutuhan beban, kapasitas saluran, *ramp rate generator*, dan juga kontingensi pada saluran transmisi. Selain itu, penelitian ini juga ingin mengetahui pengaruh dari *energi storage* pada perencanaan sistem tenaga listrik khususnya dalam hal keamanan sistem.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini sebagai berikut,

1. Aliran daya yang digunakan adalah *DC Power Flow*
2. *Ramp rate* dianggap sama untuk *ramp up* dan *ramp down*
3. Semua pembangkit diasumsikan selalu beroperasi
4. Semua saluran dalam sistem diasumsikan *double circuit*
5. Rugi umur baterai *energy storage* diabaikan
6. Biaya *maintance* dan investasi dari *energy storage* diabaikan
7. Simulasi dilakukan dengan menggunakan Matlab
8. Metode yang dipakai untuk menyelesaikan permasalahan adalah *quadratic programming*
9. Efisiensi masing-masing pembangkit dan *energy storage* dianggap 100%
10. Peletakan dan *sizing* dari *energy storage* tidak dioptimasi

1.5 Metodologi Tugas Akhir

Pada penelitian ini akan dilakukan penelitian mengenai *Security Constrained Optimal Power Flow (SCOPF)* untuk beban dinamis dengan memperhatikan batasan *ramp rate* generator, batasan saluran dan juga pengaruh *energy storage*. *Quadratic Programming* digunakan untuk menyelesaikan perhitungan *SCOPF*. Perhitungan optimal *SCOPF* akan disimulasikan dalam program *M-file*. Tahapan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah:

1. Studi pustaka

Studi yang dilakukan yaitu berdasarkan jurnal dan buku referensi. Dalam studi pustaka akan dipelajari teori pendukung mengenai *DC power flow*, *DCOPF*, *SCOPF*, karakteristik saluran, *ramp rate* pembangkit, *energy storage*, dan penggunaan *Quadratic Programming* pada *Matlab Matpower* untuk perhitungan *SCOPF*.

2. Pengumpulan data

Data yang dibutuhkan yaitu data generator, data saluran, dan data beban. Data generator terdiri dari data *cost function*, kemampuan pembangkitan maksimum dan minimum generator, dan *ramp rate* untuk masing masing generator. Data saluran terdiri dari data impedansi saluran dan kapasitas saluran.

3. Pembuatan program *M-file*

Penerapan *SCOPF* menggunakan *Quadratic Programming* pada *Matlab Matpower* dengan permasalahan dan batasan yang telah disebutkan di atas.

4. Simulasi dan analisis

Simulasi dilakukan dengan 4 kondisi yang berbeda. Kondisi pertama tanpa menyertakan batasan apapun. Kondisi kedua menyertakan batasan kapasitas saluran. Kondisi ketiga menyertakan batasan kapasitas saluran dan *ramp rate* pembangkit, dan juga kontingensi. Kondisi keempat menyertakan batasan kapasitas saluran, *ramp rate* pembangkit, kontingensi dan pengaruh *energy storage terhadap* batas keamanan sistem. Keempat kondisi ini akan dianalisis untuk mengetahui pengaruh dari batasan batasan yang ada terhadap pembangkitan daya dan biaya total pembangkitan, serta analisis sistem yang paling baik dan optimal.

5. Penulisan buku

Hasil penelitian yang telah dilakukan dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir dan dikembangkan dalam bentuk jurnal. Laporan ditulis berdasarkan kesimpulan dan hasil analisis permasalahan beserta tahapan tahapannya.

1.6 Sistematika Laporan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut :

Bab 1: PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan, serta relevansi dari Tugas Akhir.

Bab 2: ALIRAN DAYA OPTIMAL DC DENGAN BATAS KEAMANAN SISTEM MEMPERTIMBANGKAN ENERGY STORAGE

Bab ini berisi tentang dasar teori mengenai optimal power flow, DC power flow, Dynamic Optimal Power Flow, Security Constrained Optimal Power Flow, energy storage, serta penjelasan tentang quadratic programming.

Bab 3: QUADRATIC PROGRAMMING DALAM ALIRAN DAYA OPTIMAL DC DENGAN BATAS KEAMANAN SISTEM MEMPERTIMBANGKAN ENERGY STORAGE

Bab ini berisi tentang penjelasan penerapan quadratic programming untuk permasalahan aliran daya optimal DC pada beban dinamis dengan batas keamanan sistem.

Bab 4: SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini berisi hasil simulasi aliran daya optimal DC dengan batas keamanan sistem mempertimbangkan energy storage menggunakan quadratic programming serta analisis dari hasil simulasi.

Bab 5: PENUTUP

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil pembahasan masalah dan saran-saran yang dapat dilakukan yang berhubungan dengan pokok-pokok pembahasan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat berikut :

1. Dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan sistem tenaga khususnya pada permasalahan mengenai aliran daya optimal dengan batas keamanan sistem dan penggunaan *energy storage*..

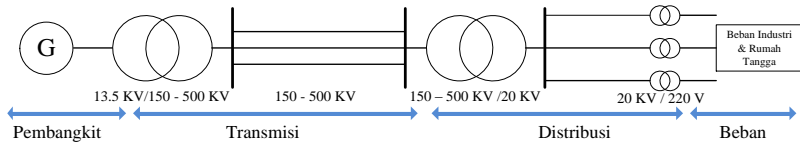
2. Dapat menambah penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) dibidang optimasi pembangkitan tenaga listrik bagi penulis
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan mengambil Tugas Akhir dengan topik yang serupa.

BAB 2

ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN BATAS KEAMANAN SISTEM MEMPERTIMBANGKAN ENERGY STORAGE

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik memiliki 4 bagian utama, yaitu pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban, seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik dibangkitkan oleh pembangkit tenaga listrik pada sisi pembangkitan, pembangkitan dapat berupa PLTA, PLTG, PLTU, ataupun PLTD. Energi listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan melalui saluran transmisi dan didistribusikan ke beban (pelanggan) melalui saluran distribusi [6].

Saluran Transmisi merupakan salah satu saluran yang penting karena dibutuhkan untuk menyalurkan energi listrik dalam jumlah besar menuju beban yang jauh jaraknya dari pusat pembangkit. Saluran Transmisi menggunakan tegangan yang tinggi untuk menyalurkan energi tersebut, hal tersebut dilakukan untuk mengurangi *losses* yang terjadi selama proses penyaluran. Terdapat parameter-parameter saluran transmisi seperti reaktansi, tahanan, dan kapasitansi yang mempengaruhi aliran daya pada saluran tersebut [7].

Dalam sistem tenaga listrik terdapat beberapa kriteria, yaitu *security*, *quality*, dan *economy* [1]. *Security* atau keamanan merupakan kriteria mengenai keamanan sistem terhadap kemungkinan terjadinya gangguan. *Quality* atau kualitas yaitu kriteria mengenai kualitas dari sistem kelistrikan. Kualitas dari sistem kelistrikan dapat dilihat dari kualitas tegangan dan frekuensi yang sesuai standar, dan pembangkitan sistem memenuhi kebutuhan beban. *Economy* atau ekonomi yaitu kriteria mengenai biaya operasi sistem. Biaya operasi khususnya biaya bahan bakar adalah biaya terbesar pada sistem operasi listrik. Terdapat teknik optimasi sehingga diharapkan sistem yang beroperasi

merupakan sistem yang ekonomis dengan tetap memperhatikan batasan batasan operasi.

2.2 Batas Keamanan Sistem

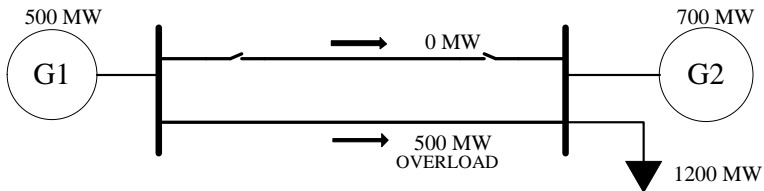
Dalam operasi sistem tenaga listrik, selain upaya untuk meminimalisasi biaya operasi, faktor penting lainnya adalah menjaga keamanan dalam operasi sistem. Salah satu faktor penting dalam operasi sistem tenaga listrik adalah kemampuan untuk mempertahankan keamanan sistem (*system security*). Keamanan sistem yang dimaksud adalah menjaga agar sistem dapat memenuhi kebutuhan beban tanpa melanggar batas operasi saat terjadi gangguan, batasan operasi dapat berupa kapasitas saluran, kemampuan maksimal pembangkit. Salah satu tindakan pengamanan sistem tenaga yang diperlukan adalah menjaga agar saluran transmisi tidak ada yang mengalami pembebanan lebih, terutama bila terdapat satu atau beberapa elemen sistem yang terganggu. Pembebanan yang berlebihan tersebut akan mengakibatkan jatuh tegangan pada elemen yang bersangkutan bertambah. Akibatnya tegangan pada beberapa bus dalam sistem tenaga tersebut juga ikut menurun dan juga dapat merusak peralatan listrik yang ada. Salah satu cara yang dilakukan untuk menjaga keamanan sistem adalah melakukan re-dispatch pembebanan pembangkit agar dapat memenuhi batasan operasi [8], khususnya kapasitas saluran transmisi agar tidak terjadi overload, sehingga tidak terjadi drop tegangan yang berlebihan.

Kontingensi adalah suatu kejadian yang disebabkan oleh kegagalan dari satu atau lebih pembangkit dan atau saluran transmisi. Kegagalan yang paling sering terjadi pada sistem kelistrikan adalah saluran transmisi. Untuk mengevaluasi kerja dan keandalan sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan menggunakan analisis kontingensi [4]. Analisis ini dilakukan dengan simulasi gangguan pada suatu saluran transmisi dan menyelidiki pengaruh gangguan tersebut terhadap biaya operasi dari pembangkit.



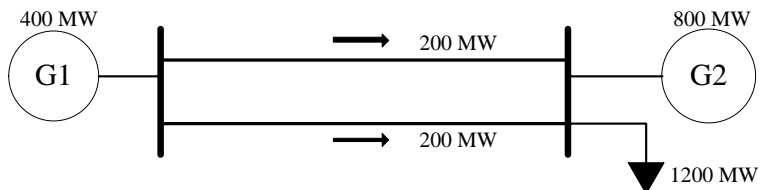
Gambar 2.2 *Optimal Dispatch* Kondisi Normal

Gambar 2.2 adalah sebuah ilustrasi yang menunjukkan pembangkitan dari 2 pembangkit dan 1 beban dengan suatu saluran *double circuit* yang telah dioptimasi secara ekonomi tanpa adanya mempertimbangkan adanya kontingensi pada saluran. Dengan pembangkitan pada masing-masing pembangkit sebesar 500 MW dan 700 MW untuk beban 1200 MW. Pada gambar tersebut diasumsikan bahwa kapasitas maksimal dari masing-masing saluran *double circuit* adalah 400 MW, sehingga tidak terdapat permasalahan pada operasi sistem.



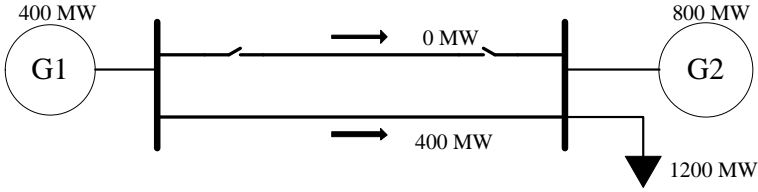
Gambar 2.3 *Post Contingency State*

Pada gambar 2.3 menunjukkan bagaimana sistem terjadi kontingensi pada saluran sehingga membuka salah satu saluran dari saluran *double circuit*. Karena putusnya salah satu saluran mengakibatkan naiknya aliran daya pada saluran lain, naiknya aliran daya ini mengakibatkan *overload* pada saluran tersebut. Diasumsikan untuk contoh ini bahwa tidak diinginkan kondisi ini terjadi, lalu dilakukan perbaikan dengan menurunkan pembangkitan sebesar 100 MW pada pembangkit 1. Menghasilkan *dispatch* seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Secure Dispatch*

Dari hasil *dispatch* tersebut didapatkan perubahan aliran daya pada saluran tersebut. Bila analisis kontingensi yang sama dilakukan maka akan didapatkan kondisi *post contingency* seperti pada gambar 2.5 yang tidak melanggar batasan kapasitas saluran.



Gambar 2.5 *Secure Post Contingency*

Dengan mengatur pembangkitan pada pembangkit 1 dan 2 dapat mencegah kondisi *post contingency* untuk menghasilkan *overload*. Hal inilah yang disebut dengan *system correction*. Program yang dapat melakukan penyesuaian pada dasar atau operasi *precontingency* untuk mencegah pelanggaran pada kondisi *post contingency* disebut dengan *security constrained optimal power flow (SCOPF)* atau aliran daya optimal dengan batas keamanan sistem [2].

2.3 DC Power Flow

DC power flow merupakan penyerdehanan dari sistem *AC power flow*. Sistem *DC power flow* hanya memperhitungan daya aktif, sedangkan daya reaktif diabaikan. Selain itu diasumsikan nilai dari magnitude tegangan $|E_i| = 1.0$ p.u. Persamaan untuk *DC power flow*:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = [B'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Aliran daya pada setiap saluran pada metode *DC power flow* ini adalah,

$$P_{ik} = \frac{1}{x_{ik}} (\theta_i - \theta_j) \quad (2.2)$$

dan daya pada setiap bus i adalah,

$$P_i = \sum_j^N P_{ij} = \sum_k^N \frac{1}{x_{ik}} (\theta_i - \theta_j) \quad (2.3)$$

2.4 Optimal Power Flow (OPF) Arus Searah

Optimal power flow (OPF) merupakan pengembangan *ED*, yaitu dengan menambahkan perhitungan aliran daya. Hasil dari perhitungan *OPF* yaitu berupa pembebanan pembangkitan yang juga memperhitungkan aliran daya dengan total biaya minimal pada sistem yang terinterkoneksi [2]. *OPF* digunakan dalam perencanaan jangka panjang maupun penjadwalan harian pada suatu sistem operasi .

Beberapa teknik optimasi yang digunakan untuk perhitungan *OPF*, antara lain metode *Newton*, *Non-Linear Programming (NLP)*, *quadratic programming*, *linear programming*, dan metode dekomposisi. Namun metode tersebut hanya mampu mencapai nilai *local minima* dan gagal untuk mencapai nilai *global minima*. Teknik optimasi mulai dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, *artificial intellegent (AI)* digunakan untuk menyelesaikannya, seperti *differential evolution*, *modified differential evolution*, *tabu search*, *evolutionary programming*, *improved EP*, *ant colony optimization*, *simulated annealing*, *genetic algorithm*, dan lain lain [9].

Optimal Power Flow merupakan permasalahan optimasi yang kompleks, yaitu optimasi dari segi *fuel cost* yang memiliki karakteristik tidak linear dengan mematuhi batasan operasi seperti kapasitas saluran. Selain itu, terdapat variabel pada batasan perhitungan *OPF* untuk mencari nilai optimal, seperti daya aktif generator, tegangan, dan sudut tegangan. *OPF* arus searah merupakan bentuk *OPF* yang menggunakan *DC power flow* dalam menghitung aliran daya yang mengalir. *OPF* arus searah memiliki kelebihan dibandingkan dengan *AC OPF*, yaitu disisi waktu perhitungan yang jauh lebih cepat karena adanya penyederhanaan parameter yang memudahkan perhitungan dan analisa sistem [2].

2.4.1 Pemodelan Matematis Permasalahan OPF Arus Searah

Fungsi biaya pembangkitan merupakan fungsi objektif yang dapat dituliskan menjadi,

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.4)$$

Keterangan:

F_i = Besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke i (rp)

P_i = Daya output dari pembangkit ke-i (MW)

a_i, b_i, c_i = Koefisien biaya operasi pembangkit ke-i

Atau dapat disederhanakan menjadi fungsi,

$$\min \sum_{n=1}^{N_{Generator}} F_n(P_n) \quad (2.5)$$

Dimana indeks generator ditunjukkan oleh n , dan $F_n(P_n)$ merupakan fungsi biaya generator. Dalam pengoperasian *AC OPF* umumnya membutuhkan waktu yang lama, untuk dapat memudahkan pengoperasian dapat disederhanakan menjadi *DC OPF*.

Aliran daya aktif dan aliran daya reaktif *AC OPF* pada saluran, dapat dinyatakan :

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j [g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.6)$$

$$Q_{ij} = V_i^2 b_{ij} - V_i V_j [g_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - b_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (2.7)$$

Keterangan,

- P_{ij} = Aliran daya aktif pada saluran ij (MW)
- Q_{ij} = Aliran daya reaktif pada saluran ij (MVar)
- V_i, V_j = Magnitudo tegangan pada bus i dan bus j (KV)
- θ_i, θ_j = Sudut tegangan pada bus i dan bus j (radian)
- g_{ij} = konduktansi ij (ohm)
- b_{ij} = Subseptansi saluran ij (ohm)

Untuk menyederhanakan *DC OPF* dari *AC OPF* ada tiga asumsi dasar yang harus diperhatikan,

1. Resistansi (r_{ij}) untuk setiap saluran km diabaikan bila dibandingkan dengan reaktansi (x_{ij}) atau $r_{ij} \ll x_{ij}$ dan dapat disetting = 0
2. Magnitudo tegangan di setiap bus = V_0
3. Perbedaan sudut tegangan ($\theta_i - \theta_j$) yang melewati saluran km cukup kecil dalam magnitudo sehingga dapat diasumsikan, $\cos(\theta_i - \theta_j) \approx 1$ dan $\sin(\theta_i - \theta_j) \approx (\theta_i - \theta_j)$

Dengan asumsi (1) memberikan nilai,

$$g_{ij} = 0 \quad (2.8)$$

$$b_{ij} = -1/x_{ij} \quad (2.9)$$

$$P_{ij} = V_i V_j \left[\frac{1}{x_{ij}} \right] \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (2.10)$$

$$Q_{ij} = V_i^2 \left[\frac{1}{x_{ij}} \right] - V_i V_j \left[\frac{1}{x_{ij}} \right] \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (2.11)$$

Dengan menambahkan hasil asumsi (2) didapatkan nilai,

$$P_{ij} = V_0^2 \left[\frac{1}{x_{ij}} \right] \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (2.12)$$

$$Q_{ij} = V_0^2 \left[\frac{1}{x_{ij}} \right] - V_0^2 \left[\frac{1}{x_{ij}} \right] \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (2.13)$$

Dengan menambahkan hasil asumsi (3) didapatkan nilai,

$$P_{ij} = V_0^2 \left[\frac{1}{x_{ij}} \right] \cdot (\theta_i - \theta_j) \quad (2.14)$$

$$Q_{ij} = V_0^2 \left[\frac{1}{x_{ij}} \right] - V_0^2 \left[\frac{1}{x_{ij}} \right] \cdot 1 = 0 \quad (2.15)$$

Dari persamaan tersebut didapatkan bahwa hanya daya aktif yang digunakan untuk perhitungan optimasi.

2.5 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) Arus Searah

Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) Arus Searah adalah pengembangan dari OPF Arus Searah yang digunakan untuk melakukan penjadwalan pembangkit dengan beban yang dinamis [3]. Beban dinamis dalam Tugas Akhir ini adalah beban yang bervariasi atau fluktuatif dalam selang waktu 1 jam selama waktu tertentu.

Setiap Pembangkit harus dapat menyesuaikan kondisi perubahan beban yang terjadi untuk dapat memenuhi kebutuhan beban tersebut. Dalam menyesuaikan perubahan beban, terdapat parameter pada yang mengatur kemampuan perubahan generator yaitu *ramp rate*, hal ini berhubungan dengan *life time* dari pembangkit dan peralatan pendukung pembangkit itu sendiri [10].

Dengan adanya *ramp rate* maka jumlah *constraints* akan bertambah, hal inilah yang membedakan OPF dengan DOPF. *Ramp rate* berfungsi sebagai kopling yang menunjukkan keterkaitan antara level pembangkitan pada waktu sesudah dan sebelumnya dalam waktu tertentu.

2.5.1 Pemodelan Matematis Permasalahan Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) Arus Searah

Pemodelan permasalahan dari DOPF arus searah merupakan pengembangan dari permasalahan OPF dengan penambahan batasan *ramp rate* untuk dapat memenuhi multi level beban.

Fungsi biaya pembangkitan merupakan fungsi objektif yang dapat dimodelkan menjadi persamaan:

$$F_i^t(P_i^t) = a_i P_i^{t^2} + b_i P_i^t + c_i \quad (2.16)$$

dengan P_i^t adalah daya keluaran dari unit generator ke-i pada saat t dan a_i , b_i , dan c_i adalah koefisien biaya untuk generator ke-i.

Fungsi objektif untuk permasalahan DOPF Arus Searah adalah:

$$\text{minimize } \sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^N F_i^t(P_i^t)) \quad (2.17)$$

Fungsi ini meminimalkan biaya pembangkitan dari semua pembangkit yang ada selama T interval waktu. T merupakan zona waktu diskrit.

Fungsi objektif tersebut diminimalkan melalui batasan:

1. Batasan keseimbangan daya aktif untuk setiap bus i,

$$P_{Gi}^t - P_{Di}^t - P_{INi}^t = 0 \quad (2.18)$$

untuk ij adalah semua saluran yang terhubung ke bus i,

$$P_{INi}^t = \sum F_{ij}^t = \sum \frac{1}{x_{ij}} [\theta_i - \theta_j] \quad (2.19)$$

2. Batasan aliran daya aktif untuk setiap saluran ij,

$$|F_{ij}^t| \leq F_{ij}^u \quad (2.20)$$

3. Batasan pembangkitan daya aktif untuk setiap Generator i,

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi}^t \leq P_{Gi}^{max} = 0 \quad (2.21)$$

4. Batasan *ramp rate*

$$-\delta_i \leq P_i^{t+1} - P_i^t \leq \delta_i \quad (2.22)$$

δ_i merupakan *ramp rate* limit dari generator ke- i , *ramp rate* pada tugas akhir ini memiliki nilai yang konstan dan memiliki nilai yang sama untuk *ramp up* dan juga *ramp down*. *Ramp rate* bertugas sebagai kopling yang menghubungkan ikatan antara level pembangkitan sebelum dan sesudahnya.

2.6 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) Arus Searah dengan Batas Keamanan Sistem

Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) dapat digunakan untuk perencanaan dengan multilevel beban sesuai dengan kondisi *realtime*, dengan *ramp rate* sebagai kopling yang mengatur perubahan dispatch dalam mengatasi perubahan beban yang terjadi [4]. Batasan *ramp rate* digunakan untuk menjaga lifetime dari pembangkit dan alat pendukungnya.

Untuk dapat mengembangkan DOPF dalam keadaan *real*, batasan keamanan berupa kontingensi ditambahkan pada sistem. Saat terjadi kontingensi pada saluran ataupun generator, hal tersebut akan memberikan perubahan pada operasi sistem. Kontingensi dapat terjadi pada suatu waktu dalam suatu rentang operasi waktu tertentu. Untuk itu penambahan batasan keamanan sistem pada DOPF bertujuan agar bila terjadi suatu kondisi pada suatu waktu pada rentang operasi tersebut dapat dilakukan pencegahan agar tidak ada pembangkitan yang melanggar batasan operasi. Dengan adanya pertimbangan kontingensi, batasan-batasan yang ada akan bertambah. Sehingga akan menjadikan optimasi DOPF menjadi semakin kompleks.

Batasan-batasan kondisi normal,

1. Batasan keseimbangan daya aktif untuk setiap bus i ,

$$P_{Gi}^t - P_{Di}^t - P_{INi}^t = 0 \quad (2.23)$$

untuk ij adalah semua saluran yang terhubung ke bus i ,

$$P_{INi}^t = \sum F_{ij}^t = \sum \frac{1}{x_{ij}} [\theta_i - \theta_j] \quad (2.24)$$

2. Batasan aliran daya aktif untuk setiap saluran ij ,

$$|F_{ij}^t| \leq F_{ij}^u \quad (2.25)$$

3. Batasan pembangkitan daya aktif untuk setiap generator i,

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi}^t \leq P_{Gi}^{max} = 0 \quad (2.26)$$

4. Setting sudut tegangan pada bus referensi,

$$\theta_{ref} = 0 \quad (2.27)$$

Batasan- batasan saat kondisi kontingensi,

1. Batasan keseimbangan daya aktif untuk setiap bus i,

$$P_{Gi}^{kt} - P_{Di}^{kt} - P_{INi}^{kt} = 0 \quad (2.28)$$

untuk ij adalah semua saluran yang terhubung ke bus i,

$$P_{INi}^{kt} = \sum F_{ij}^{kt} = \sum \frac{1}{x_{ij}} [\theta_i - \theta_j] \quad (2.29)$$

2. Batasan aliran daya aktif untuk setiap saluran ij,

$$|F_{ij}^{kt}| \leq F_{ij}^u \quad (2.30)$$

3. Batasan pembangkitan daya aktif untuk setiap Generator i,

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi}^{kt} \leq P_{Gi}^{max} = 0 \quad (2.31)$$

4. Setting sudut tegangan pada bus referensi

$$\theta_{ref} = 0 \quad (2.32)$$

Dari dua batasan tersebut, terdapat kopling berupa *ramp rate* generator yang menghubungkan antara kondisi normal dan kondisi kontingensi. *Ramp rate* berpengaruh dan memberikan batasan pada proses re-dispatch generator pada saat kondisi kontingensi.

2.7 Energy Storage

Energy Storage adalah tempat untuk menyimpan energi yang nantinya dapat digunakan di waktu yang berbeda. Salah satu contoh dari

energy storage adalah baterai. Baterai sudah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi dalam sistem tenaga [5], seperti membantu dalam memenuhi perubahan beban, memotong puncak beban, dan juga menyediakan fleksibilitas yang dibutuhkan oleh sumber pembangkit energi terbarukan yang *intermittent* [11]. Baterai banyak digunakan sebagai *energy storage* karena karakteristik baterai yang dapat melakukan *charging* dan *discharging* energi dengan cepat. Karena hal tersebut, *energy storage* khususnya baterai dapat digunakan untuk membantu sistem dalam mengatasi kontingensi pada saluran transmisi. Pada [12] *energy storage* digunakan sebagai *corrective control* untuk membantu dalam mengatasi kontingensi. Perencanaan sistem *OPF* dengan mempertimbangkan keamanan sistem cenderung menghasilkan biaya yang lebih besar, karena dilakukannya *dispatch* ulang, untuk itu *energy storage* yang terdistribusi digunakan dalam membantu meminimalkan hal tersebut, sehingga biaya yang dibutuhkan akibat adanya kontingensi dapat menjadi lebih murah. Pada [13] *energy storage* memberikan pengaruh kepada sistem dengan menurunkan biaya pembangkitan yang ada selama 24 jam. Baterai *energy storage* memiliki batasan-batasan yang harus dipenuhi selama beroperasi, batasan tersebut berupa *state of charge* (SOC) yang menunjukkan kondisi baterai untuk melakukan *charging* dan *discharging* baterai tersebut. Batasan tersebut dapat dimodelkan menjadi persamaan,

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (2.33)$$

$$E_{ES \min} \leq E_0 - \sum_{t=1}^T E_{ES}(t) \leq E_{ES \max} \quad (2.34)$$

$$E_{ES}(t) = P_{ES}(t) \times h \quad (2.35)$$

Keterangan,

$E_{ES \min}$ = Batas bawah baterai dalam satuan energi

$E_{ES \max}$ = Batas atas baterai dalam satuan energi

E_0 = Energi mulai pada baterai

E_{ES} = Energi keluaran baterai saat t

P_{ES} = Daya keluaran baterai

t = Waktu operasi

Persamaan tersebut yang akan mengatur daya output yang dikeluarkan baterai tiap jamnya, untuk *charging* ataupun *discharging*.

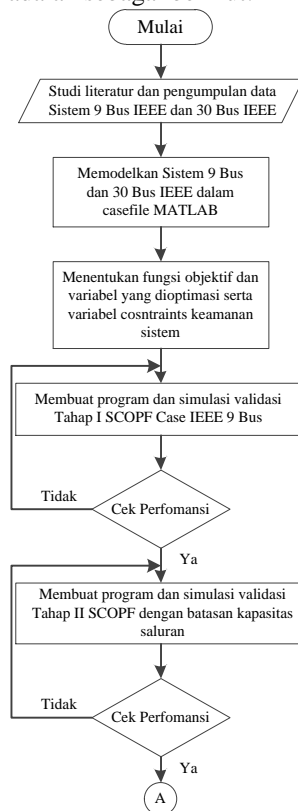
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

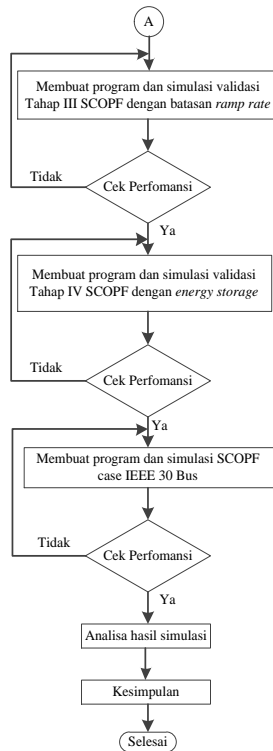
QUADRATIC PROGRAMMING DALAM ALIRAN DAYA OPTIMAL ARUS SEARAH MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN SISTEM DENGAN ENERGY STORAGE

3.1 Algoritma

Dalam tugas akhir ini *quadratic programming* digunakan untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya optimal mempertimbangkan batas keamanan sistem (SCOPF) dengan energy storage. Dengan alur penyelesaian penelitian adalah sebagai berikut.



Gambar 3.1 Flowchart alur sistem keseluruhan



Gambar 3.2 Lanjutan *flowchart* alur sistem keseluruhan

Pengerjaan tugas akhir ini dimulai dengan studi literatur mengenai sistem kelistrikan, keamanan sistem, aliran daya optimal (OPF), dan *energy storage*. Selain studi literatur juga dilakukan pengumpulan data beban dan pembangkit untuk sistem IEEE 9 bus dan sistem IEEE 30 bus. Kemudian sistem tersebut dimodelkan menjadi *casefile* menggunakan M-file Matlab. Setelah itu menentukan fungsi objektif, variabel yang dioptimasi serta batasan-batasan operasi termasuk batasan keamanan sistem. Pembuatan program SCOPF dengan *energy storage* dilakukan dengan empat tahap validasi untuk melihat pengaruh batasan batasan sistem terhadap permasalahan SCOPF. Tahap validasi dilakukan pada sistem IEEE 9 bus.

Tahap pertama yaitu validasi *quadratic programming* SCOPF dengan DC OPF Matpower secara individual. Validasi dilakukan dengan mengecek daya pembangkitan dan sudut tegangan tanpa ada batasan ramp rate. Program valid jika daya pembangkitan generator dan sudut tegangan telah sama antara SCOPF dengan DC OPF Matpower. Apabila sudah sesuai, dilanjutkan dengan validasi program tahap kedua. Pada tahap kedua validasi dilakukan untuk mengecek output daya saluran program *quadratic programming* SCOPF masih sesuai dengan batasan kapasitas saluran sistem. Apabila sudah sesuai, maka dilanjutkan dengan validasi pada tahap ketiga. Pada tahap ketiga dilakukan validasi program *quadratic programming* SCOPF dengan adanya tambahan batasan *ramp rate*. Validasi dilakukan dengan mengecek daya pembangkitan pada saat perubahan beban dan saat terjadi kontingensi sesuai dengan batasan *ramp rate* yang ada. Apabila sudah sesuai, maka dilanjutkan validasi tahap keempat.

Pada tahap keempat, dilakukan validasi program SCOPF dengan adanya penambahan *energy storage* berupa baterai ke sistem. Validasi dilakukan dengan mengecek daya keluaran dari baterai *energy storage* sudah sesuai dengan batasan operasinya. Bila validasi sudah sesuai, dilanjutkan menuju tahap akhir yaitu mengimplementasikan program pada sistem IEEE 30 bus. Hasil keluaran program pada sistem IEEE 30 bus kemudian dianalisa dan dibandingkan. Hasil yang dibandingkan yaitu daya pembangkitan masing masing generator dan total biaya. Setelah dilakukan analisa dan perbandingan, maka didapatkan kesimpulan dari tugas akhir ini.

3.2 Quadratic Programming pada Matlab

Pada Matlab terdapat fungsi quadprog yang digunakan untuk melakukan penyelesaian permasalahan optimasi fungsi kuadrat dengan metode quadratic programming. Matpower merupakan salah satu M-files yang telah dikembangkan untuk penyelesaian OPF. Pada Matpower, terdapat fungsi qps_matpower yang merupakan bentuk pengembangan dari quadprog [3].

Dari tabel 3.1 dapat terlihat perbedaan dari quadprog dan qps_matpower. Perbedaan mendasar antara quadprog dengan qps_matpower adalah definisi *constraints*. Pada qps_matpower *equality* dan *inequality constraints* digabung menjadi satu dan dinyatakan dalam matrik A dan vektor l dan u.

Tabel 3.1 Perbedaan Quadprog dengan Qps_matpower

Method	quadprog	qps_matpower
<i>Minimiza function</i>	$F(x) = 1/2 * x' * H * x + f' * x$	$F(x) = 1/2 * x' * H * x + C' * x$
<i>Constraints</i>	<ul style="list-style-type: none"> Equality constraints: $A_{eq} * x = b_{eq}$ Inequality constraints: $A * x \leq b$ $lb \leq x \leq ub$ 	<ul style="list-style-type: none"> Equality constraints: set $l = u$ $l \leq A * x \leq u$ Inequality constraints: set $l \neq u$ $l \leq A * x \leq u$ $xmin \leq x \leq xmax$

Berikut adalah argumen input pada qps_matpower:

- **H** : matriks simetris yang menyatakan bentuk kuadratik dari fungsi objektif.
- **C** : vektor yang menyatakan bentuk linear dari fungsi objektif.
- **A** : matriks yang menyatakan koefisien linear dari semua *constraints* baik *inequality* maupun *equality constraints*.
- **l** : vektor yang menyatakan batas atas dari persamaan *inequality* dan *equality constraints*.
- **u** : vektor yang menyatakan batas bawah dari persamaan *inequality* dan *equality constraints*.
- **xmax** : vektor yang menyatakan batas nilai atas dari persamaan $xmin \leq x \leq xmax$
- **xmin** : vektor yang menyatakan batas nilai bawah dari persamaan $xmin \leq x \leq xmax$
- **x** : nilai vector yang dicari dalam penyelesaian masalah

Beberapa contoh perintah yang dapat digunakan untuk memanggil program dengan argumen input dalam qps_matpower adalah sebagai berikut:

- $x = \text{qps_matpower}(H, c, A, l, u)$
Meminimalkan vektor x terhadap *inequality* dan *equality constraint* $l \leq A * x \leq u$, H dan c merupakan fungsi objektif *quadratic programming*.
- $x = \text{qps_matpower}(H, c, A, l, u, xmin, xmax)$

Meminimalkan vektor x terhadap *inequality* dan *equality constraint* $l \leq A^*x \leq u$ dan terdapat batasan nilai x maksimal dan x minimal. H dan c merupakan fungsi objektif *quadratic programming*.

- $x = \text{qps_matpower}(H, c, A, l, u, x_{\min}, x_{\max}, x_0)$
Menyelesaikan permasalahan *quadratic programming* dengan inisialisasi

3.3 Penerapan Quadratic Programming pada Aliran Daya Optimal Dinamis

Penerapan *quadratic programming* (qps_matpower) dilakukan dengan inisialisasi permasalahan DOPF kedalam program. Inisialisasi terdiri dari dua komponen utama yaitu fungsi objektif dan batasan masalah atau *constraints*.

3.3.1 Inisialisasi Fungsi Objektif dan Constraints

Fungsi objektif :

$$\text{minimize} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N F_i^t(P_i^t) \right)$$

$$F_i^t(P_i^t) = a_i P_i^{t^2} + b_i P_i^t + c_i$$

Keterangan

T = Jumlah rentang waktu beban

N = Jumlah generator

P_i^t = Daya pembangkitan generator ke- i pada waktu ke- t

$F_i^t(P_i^t)$ = Fungsi biaya generator ke- i pada waktu ke- t

Fungsi ini meminimalkan biaya pembangkitan dari semua pembangkit yang ada selama T interval waktu. T merupakan zona waktu diskrit.

Fungsi objektif tersebut diminimalkan melalui beberapa batasan yaitu:

- *Equality Constraints:*

- *Active Power Balance*

$$P_{Gi}^t - P_{Di}^t - P_{INi}^t = 0 \quad (3.1)$$

$$P_{INi}^t = \sum_{x_{ij}} \frac{1}{x_{ij}} [\theta_i - \theta_j] \quad (3.2)$$

Keterangan

P_{IN} = Daya yang mengalir pada saluran dari bus i ke bus j ,

δ = Sudut tegangan

x = Reaktansi saluran

- *Inequality Constraints:*
- Kapasitas Saluran Transmisi

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij} \quad (3.3)$$

- Daya Pembangkitan

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi}^t \leq P_{Gi}^{max} \quad (3.4)$$

- *Ramp Rate*

$$-\delta_i \leq P_i^{t+1} - P_i^t \leq \delta_i \quad (3.5)$$

- *Energy Storage*

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (3.6)$$

$$E_{ES \min} \leq E_0 - \sum_{t=1}^T E_{ES}(t) \leq E_{ES \max} \quad (3.7)$$

$$E_{ES}(t) = P_{ES}(t) \times h \quad (3.8)$$

Variabel yang dioptimasi disebut juga dengan variabel kontrol. Pada permasalahan *optimal power flow* sederhana, variabel kontrol berupa sudut tegangan dan daya pembangkitan generator. Dengan adanya *energy storage* variabel kontrol bertambah menjadi sudut tegangan, daya pembangkitan generator dan daya keluaran dari baterai *energy storage*. Jika nb adalah jumlah bus pada sistem, ng adalah jumlah generator, dan ne adalah jumlah *energy storage*, maka jumlah variabel adalah n , dimana $n=nb+ng+ne$. Sehingga ukuran matrik x yang merupakan variabel kontrol adalah $[n,1]$. Sebagai contoh $nb=3$, $ng=2$, dan $ne=1$, maka total matrix nya akan menjadi $[6,1]$. Sehingga dapat ditulis dengan persamaan berikut.

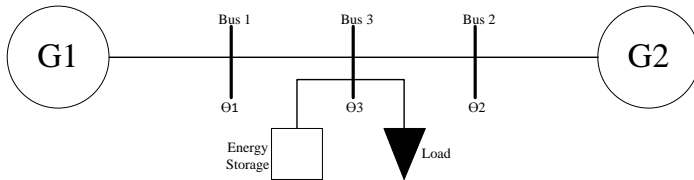
$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ P_{G1} \\ P_{G2} \\ P_{ES} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.3.2 Aliran Daya Optimal Dinamis Pada Quadratic Programming

Berdasarkan inisialisasi DOPF serta persamaan pada quadratic programming, maka DOPF dapat diselesaikan dengan tahap sebagai berikut.

3.3.2.1 Pembentukan Matrik H Simetris yang Menyatakan Bentuk Kuadrat dari Fungsi Objektif

Matriks H merupakan koefisien orde dua variabel kontrol dari fungsi objektif. Berdasarkan persamaan fungsi objektif *quadratic programming*, matriks H dikalikan dengan x^T dan x (variabel kontrol), maka besarnya matriks H adalah matriks simetris $n \times n$, dengan n sejumlah variabel kontrol. Untuk mempermudah penjelasan tentang pembentukan matrik digunakan contoh sistem kelistrikan sederhana yang terdiri dari 3 bus dengan 2 generator, 1 beban dan 1 *energy storage* seperti gambar 3.2.



Gambar 3.3 Sistem 3 Bus.

Matriks H dengan periode 1 jam pada sistem 3 bus seperti diatas dapat dituliskan sebagai berikut:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_1^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_2^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Nilai 0 pada sisi diagonal terakhir adalah nilai fungsi biaya *energy storage*, nilai tersebut 0 karena fungsi biaya dari *energy storage* untuk operasional tidak ada atau tidak membutuhkan bahan bakar untuk bekerja. Untuk matriks H dengan periode lebih dari satu jam, maka matriks H saat $t+1$ disusun secara diagonal dibawah matriks H saat t jam.

3.3.2.2 Pembentukan Vektor Linier C yang Menyatakan Bentuk Linear dari Fungsi Objektif

Vektor C merupakan koefisien orde satu variabel kontrol dari fungsi objektif. Matriks C^T dapat dituliskan sebagai berikut

$$C^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad b_1^1 \quad b_2^1 \quad 0]$$

Untuk matriks C dengan periode lebih dari satu jam, maka matriks C saat $t+1$ disusun secara vertikal dibawah matriks C saat t jam. Nilai 0 pada sisi terakhir adalah nilai biaya dari *energy storage*.

3.3.2.3 Pembentukan Matriks A

Matriks A merupakan matriks koefisien orde satu untuk variabel kontrol dari batasan-batasan permasalahan. Dalam matriks A terdiri dari *equality constraint* (A_{eq}) dan *inequality constraint* (A_{ineq}). *Equality constraint* (A_{eq}) terdiri dari *active power balance*, sedangkan *inequality constraint* (A_{ineq}) terdiri dari kapasitas saluran, ramp rate, dan batasan energi dari baterai.

Gambar 3.2 digunakan sebagai contoh untuk memudahkan penjelasan mengenai matriks A .

$$A = \begin{bmatrix} A_{eq} \\ A_{ineq} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Equality constraint (A_{eq})

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 & -y_{13} & -1 & 0 \\ 0 & y_{22} & -y_{23} & 0 & -1 \\ -y_{13} & -y_{23} & y_{33} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Inequality constraint (A_{ineq})

$$A_{ineq \text{ branch}} = \begin{bmatrix} y_{13} & 0 & -y_{13} & 0 & 0 \\ 0 & y_{23} & -y_{23} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$A_{\text{ineq ramp rate}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Level } t}$
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Level } kt}$

Batasan *ramp rate* digunakan untuk kopling pembangkitan antara kondisi normal dan juga kondisi kontingensi, selain itu *ramp rate* juga merupakan kopling antara kondisi normal pada waktu t dengan kondisi normal pada waktu $t+1$.

$$A_{\text{ineq battery limit}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Level}}$
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Level } kt}$

Batasan energi limit baterai digunakan untuk mengatur daya keluaran dari operasi *battery energy storage*. Batasan ini ditentukan oleh SOC dari baterai *energy storage*. Selain sebagai penghubung antara kondisi normal dan kondisi kontingensi, energi limit juga merupakan penghubung setiap jamnya kondisi normal.

Dengan mempertimbangkan batasan keamanan sistem, maka terdapat dua kondisi pada setiap jam level beban yaitu kondisi normal dan juga kondisi kontingensi. Adanya kontingensi saluran menyebabkan perubahan pada nilai impedansi saluran dan kapasitas saluran. Pada saluran double circuit nilai impedansi saluran (Z) menjadi dua kali lipat dari nilai pada kondisi normalnya dan kapasitas saluran menjadi setengah dari kapasitas normalnya. Dengan perubahan impedansi dan kapasitas saluran, akan terjadi pembangkitan ulang agar dapat memenuhi batasan tersebut. Pembangkitan ulang tersebut dibatasi oleh batasan *ramp rate* yang ada disetiap pembangkit.

Dari hal tersebut, matriks A untuk 1 level beban dengan kondisi normal dan kondisi kontingensi dapat dituliskan sebagai berikut.

A=

A_{eq}^t						0	0	0	0	0
						0	0	0	0	0
						0	0	0	0	0
$A_{ineq\ branch}^t$						0	0	0	0	0
						0	0	0	0	0
						0	0	0	0	0
						0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	A_{eq}^{kt}					
0	0	0	0	0						
0	0	0	0	0						
0	0	0	0	0	$A_{ineq\ branch}^{kt}$					
0	0	0	0	0						
0	0	0	0	0						
0	0	0	0	0						
RR										
$Battery\ Limit$										

Gambar 3.4 Matrix A 1 Level beban

Untuk beban yang dinamis, setiap level beban harus terdapat kondisi normal dan juga kondisi kontingensi. Untuk level beban berikutnya, matriks A^{t+1} dimasukan secara diagonal dibawah matrik A^t .

A=	A^l			0	...	0	0	...	...	...	...	0
				\vdots		\vdots	\vdots				\ddots	\vdots
				0	...	0	\vdots				\ddots	\vdots
	0	...	0	A^{kl}			\vdots		\ddots		\vdots	
	\vdots		\vdots				\vdots	\ddots			\vdots	
	0	...	0				0	...	...	...	...	0
	0	...	...	...	...	0	A^2			0	...	0
	\vdots				\ddots	\vdots				\vdots		\vdots
	\vdots				\ddots	\vdots				0	...	0
	\vdots		\ddots			\vdots	0	...	0	A^{k2}		
	\vdots	\ddots				\vdots	\vdots		\vdots			
	0	...	...	...	...	0	0	...	0			
Ramp Rate												
Battery limit												

Gambar 3.5 Matrix A untuk Multi Level Beban

3.3.2.4 Pembentukan Vektor lb, ub

Vektor lb dan ub merupakan batas atas dan batas bawah constraint sistem. Panjang vektor lb dan ub adalah sepanjang baris matriks A.

$$lb = \begin{bmatrix} 0^1 \\ 0^1 \\ P_{L3}^1 \\ -P_{13}^1 \\ -P_{23}^1 \\ 0^2 \\ 0^2 \\ P_{L3}^2 \\ -P_{13}^2 \\ -P_{23}^2 \\ -RR^{12} \\ E_{min} - E_0 \\ E_{min} - E_0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0^1 \\ 0^1 \\ P_{L3}^1 \\ P_{13}^1 \\ P_{23}^1 \\ 0^2 \\ 0^2 \\ P_{L3}^2 \\ P_{13}^2 \\ P_{23}^2 \\ RR^{12} \\ E_{max} - E_0 \\ E_{max} - E_0 \end{bmatrix} = ub \quad (3.16)$$

3.3.2.5 Pembentukan Vektor xmin dan xmax

Vektor x_{min} dan x_{max} merupakan batas atas dan batas bawah dari variabel kontrol (x). Pada DCOPF variabel kontrol yaitu berupa sudut tegangan, daya terbangkit generator, dan daya output baterai. Sehingga vektor x_{min} dan x_{max} akan berisi batas atas dan batas bawah variabel tersebut.

$$\begin{bmatrix} \theta_1^t \min \\ \theta_2^t \min \\ \theta_2^t \min \\ p_{G1}^t \min \\ p_{G2}^t \min \\ p_{es}^t \min \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_1^t \\ \theta_2^t \\ \theta_2^t \\ p_{G1}^t \\ p_{G2}^t \\ p_{es}^t \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_1^t \max \\ \theta_2^t \max \\ \theta_2^t \max \\ p_{G1}^t \max \\ p_{G2}^t \max \\ p_{es}^t \max \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Analisis Kontingensi

Analisa kontingensi adalah suatu komponen terpenting dalam batas keamanan sistem pada aliran daya optimal. Analisa kontingensi dilakukan pada setiap saluran-saluran sistem yang digunakan. Dengan melakukan analisa kontingensi akan dapat mengetahui saluran yang memiliki dampak terbesar pada sistem. Pada pengujian ini, dampak kontingensi pada saluran dilihat dari sisi biaya operasi sistem.

4.1.1 Analisa Kontingensi Sistem 9 Bus

Analisis kontingensi dari sistem 9 bus IEEE menghasilkan daftar urutan dari saluran yang memiliki dampak terbesar hingga terkecil pada saat saluran tersebut lepas.

Tabel 4.1 Daftar Dampak Kontingensi Sistem 9 Bus

No	Bus	Ke Bus	Biaya (\$)
1	8	2	5900
2	9	4	5732
3	1	4	5732
4	3	6	5732
5	5	6	5732
6	4	5	5732
7	6	7	5732
8	7	8	5732
9	8	9	5732

Dari tabel 4.1 dapat diketahui bahwa saluran dari bus 8 ke bus 2 adalah saluran yang menghasilkan dampak terbesar bila terjadi kontingensi dilihat dari segi biaya pembangkitan.

4.1.2 Analisa Kontingensi Sistem 30 Bus

Analisis kontingensi dari sistem modifikasi 30 bus IEEE menghasilkan saluran- saluran yang memiliki dampak terbesar pada saat saluran tersebut lepas. Analisa dilakukan pada beban puncak.

Tabel 4.2 Daftar Dampak Kontingensi Sistem 30 Bus

No	Bus	Ke Bus	Biaya (\$)
1	21	22	935.1
2	25	27	933.9
3	12	13	933.1
4	4	6	933.1
5	6	7	933.1
6	24	25	933.1
7	4	12	933.1
8	5	7	933.1
9	2	4	933.1
10	2	6	933.1

Dari tabel 4.2 dapat diketahui bahwa saluran yang menghubungkan bus 21 ke bus 22 adalah saluran yang memberikan dampak paling besar bila terjadi gangguan dilihat dari segi biaya pembangkitan.

4.2 Simulasi Sistem 9 Bus

Validasi dilakukan pada program batas keamanan sistem pada aliran daya optimal pada beban dinamis, yang selanjutnya disebut *Secuirty Constrained DC OPF* atau *SCDC OPF*, diuji terlebih dahulu dengan DC OPF Matpower. Pada pengujian ini akan dilakukan beberapa tahap validasi sebagai berikut,

1. Validasi tanpa batasan
2. Validasi batasan saluran
3. Validasi batasan *ramp rate*
4. Validasi batasan *energy storage* pada sistem

Pengujian dilakukan pada sistem modifikasi IEEE 9 Bus dengan data seperti pada tabel 4.3, tabel 4.4, tabel 4.5. *Single line diagram* sistem dapat dilihat pada gambar 4.1.

Tabel 4.3 Data Bus Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus

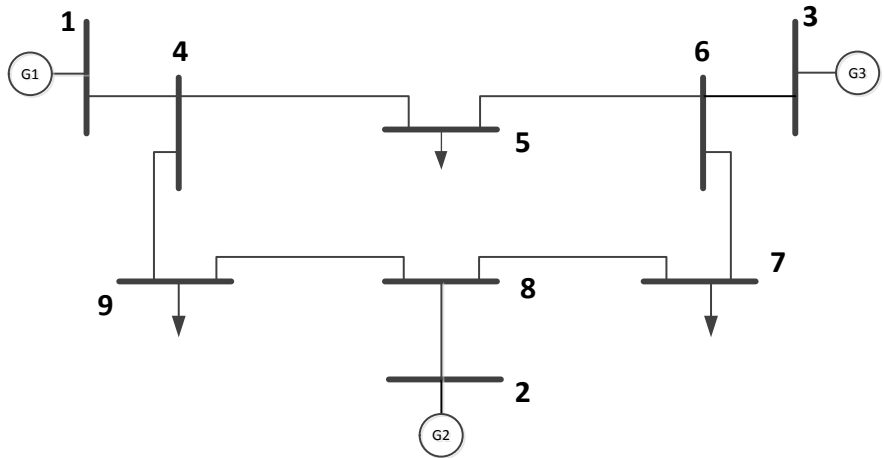
Bus	Tipe Bus	Pd	Tegangan (KV)
1	3	0	345
2	2	0	345
3	2	0	345
4	1	0	345
5	1	110	345
6	1	0	345
7	1	120	345
8	1	0	345
9	1	145	345

Tabel 4.4 Data Pembangkitan Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus

Unit	<i>Cost Function</i>	P max (MW)	P min (MW)	Ramp Rate (MW/Jam)
1	$0.11P_1^2 + 5P_1 + 150$	270	10	30
2	$0.085P_2^2 + 1.2P_2 + 600$	320	10	40
3	$0.1225P_3^2 + P_3 + 150$	290	10	35

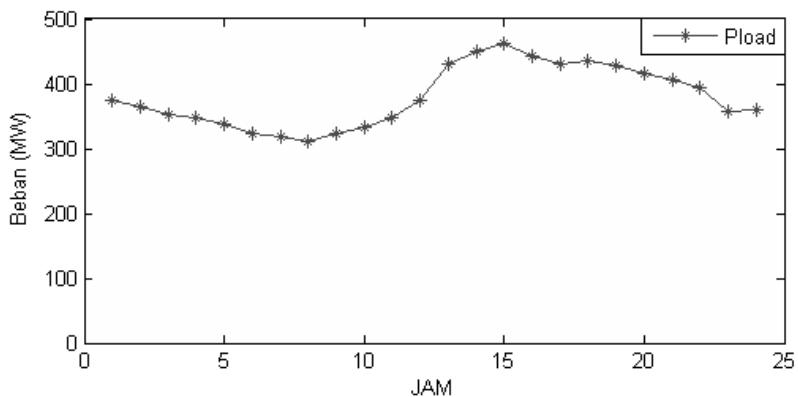
Tabel 4.5 Data Saluran Sistem Modifikasi IEEE 9 Bus

Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MW)
1	1	4	0.0576	250
2	4	5	0.092	250
3	5	6	0.17	150
4	3	6	0.0586	300
5	6	7	0.1008	150
6	7	8	0.072	250
7	8	2	0.0625	250
8	8	9	0.161	250
9	9	4	0.085	250



Gambar 4.1 Sistem 9 Bus

Beban yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah beban dinamis, dimana beban berubah terhadap waktu tertentu. Interval perubahan beban adalah 1 jam yang terjadi selama 24 jam. Beban dasar yang digunakan sesuai beban pada tabel 4.3. Untuk Pengujian ini digunakan 2 profil beban seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Profil Beban Sistem 9 Bus

4.2.1 Validasi Tahap 1

Validasi ini bertujuan untuk membandingkan apakah hasil simulasi sistem 9 bus SCDC DOPF memiliki hasil yang sesuai dengan simulasi DC OPF Matpower secara individual. Beban yang digunakan adalah 2 level beban pada profil beban. Validasi quadratic programming pada optimal power flow dengan sistem 9 bus akan membandingkan dua program berikut,

- DC OPF Matpower : Simulasi dilakukan dua kali dengan data beban sesuai tabel 4.3 yang diterapkan secara bergantian
- SCDC OPF : Simulasi dilakukan secara simultan tanpa ada batasan, hasil yang dibandingkan adalah kondisi normal

Tabel 4.6 Data 2 Level Beban Profile Beban Sistem 9 Bus

Jam ke-	Beban yang terpenuhi (MW)			Total (MW)
	Bus 5	Bus 7	Bus 9	
1	110	120	145	375
2	106.7	116.4	140.65	363.75

4.2.1.1 Simulasi Validasi Tahap 1

Tabel 4.7 menunjukkan hasil perbandingan simulasi validasi SCDC OPF dengan DC OPF Matpower yang dilakukan secara individual, variabel output terdiri dari sudut tegangan bus (θ), daya pembangkitan (P) dalam MW dan total biaya pembangkitan dalam \$.

4.2.1.2 Analisa Validasi Tahap 1

Dari hasil simulasi pada sistem 9 bus dapat dilihat bahwa SCDC OPF dapat menghasilkan pembangkitan yang sesuai dengan kebutuhan beban. Selain itu, sudut tegangan, daya masing-masing unit pembangkit, dan juga biaya yang dihasilkan dari simulasi SCDC OPF sesuai dengan simulasi DC OPF Matpower. Dapat disimpulkan bahwa quadratic programming dapat digunakan untuk perhitungan optimal power flow arus searah dengan akurat.

Tabel 4.7 Hasil Validasi Tahap 1

Variabel Output	DC OPF Matpower		SCDC OPF	
	Jam 1	Jam 2	Jam 1	Jam 2
01	0	0	0	0
02	0.1203	0.1175	0.1203	0.1175
03	0.0768	0.0753	0.0768	0.0753
04	-0.0607	-0.0587	-0.0607	-0.0587
05	-0.1009	-0.0975	-0.1009	-0.0975
06	0.0118	0.0121	0.0118	0.0121
07	-0.0332	-0.0315	-0.0332	-0.0315
08	0.0211	0.0211	0.0211	0.0211
09	-0.1131	-0.1093	-0.1131	-0.1093
P1	105.36	101.84	105.36	101.84
P2	158.7	154.14	158.7	154.14
P3	110.94	107.77	110.94	107.77
Total Daya (MW)	375	363.75	375	363.75
Total Biaya (\$)	11082.8		11082.8	

4.2.2 Validasi Tahap 2

Validasi tahap 2 adalah validasi terhadap batasan saluran sistem saat kondisi normal dan kondisi kontingensi. Validasi ini bertujuan untuk mengetahui apakah *quadratic programming* yang akan digunakan untuk perhitungan *optimal power flow* arus searah menghasilkan perhitungan daya keluaran dari masing-masing unit pembangkit tanpa melewati batasan saluran transmisi baik saat kondisi normal dan juga kondisi kontingensi, dengan batasan saluran sesuai pada tabel 4.5. Pengujian dilakukan sesuai beban pada tabel 4.3.

- Kondisi 1 : kondisi normal
- Kondisi 2 : Kondisi kontingensi pada saluran dari bus 8 ke bus 2.

Saluran bus 8 ke bus 2 dipilih karena sesuai dengan analisa kontingensi pada tabel 4.1, bahwa saluran dari bus 8 ke bus 2 merupakan saluran yang paling berdampak besar bila terjadi kontingensi.

4.2.2.1 Simulasi Validasi Tahap 2

Hasil aliran daya pada setiap saluran untuk simulasi tahap 2 ditunjukkan pada tabel 4.8

Tabel 4.8 Hasil Validasi Tahap 2

Saluran	Kapasitas Saluran (MW)	Kondisi (MW)	
		1	2
1-4	250	105.36	114.72
4-5	250	43.70	40.19
5-6	150	66.30	69.81
3-6	300	110.94	138.10
6-8	150	44.64	68.29
7-9	250	75.36	51.71
8-2	250	158.70	122.18
8-9	250	83.34	70.47
9-4	250	61.66	74.53

4.2.2.2 Analisa Validasi Tahap 2

Hasil simulasi pada tabel 4.6 menunjukan bahwa daya yang mengalir pada setiap saluran tidak ada yang melanggar batasan saluran. Pada kondisi 2 (kondisi kontingensi) terjadi perubahan aliran daya, karena pada saluran bus 8 ke bus 2 mengalami kontingensi yang menyebabkan kapasitas saluran yang semula adalah 250 MW berubah menjadi setengah kapasitasnya atau menjadi 125 MW. Karena hal tersebut dapat dilihat daya pada saluran bus 8 ke bus 2 yang bila pada kondisi normal 158.7 MW berubah menjadi 122.18 MW pada kondisi kontingensi untuk menghindari pelanggaran batasan saluran yang ada. Dari hal tersebut dapat disimpulkan bahwa quadratic programming yang dibuat mampu untuk melakukan perhitungan optimal power flow arus searah dengan memperhitungkan batasan saluran dengan akurat.

4.2.3 Validasi Tahap 3

Validasi tahap 3 adalah validasi terhadap batasan *ramp rate* pembangkit yang merupakan penghubung antara kondisi normal ke kondisi kontingensi dan antara kondisi normal jam t ke $t+1$. Validasi ini bertujuan untuk mengetahui apakah *quadratic programming* yang akan digunakan untuk perhitungan *optimal power flow* arus searah menghasilkan perhitungan daya keluaran dari masing-masing unit pembangkit tanpa melewati batasan *ramp rate* saat terjadi kontingensi dan perubahan beban, dengan batasan *ramp rate* sesuai pada tabel 4.3. Pengujian dilakukan dengan menggunakan data profil beban gambar 1 selama 2 jam.

- Kondisi 1 : kondisi normal
- Kondisi 2 : Kondisi kontingensi pada saluran dari bus 8 ke bus 2

4.2.3.1 Simulasi Validasi Tahap 3

Hasil simulasi sistem 9 Bus untuk SCDC DOPF tanpa *constraint ramp rate* dan SCDC DOPF dengan *constraint ramp rate* menggunakan *quadratic programming* dapat dilihat pada tabel 4.9 dan tabel 4.11.

Tabel 4.9 Daya Pembangkitan Tanpa Batasan *Ramp Rate*

Unit Pembangkit	Ramp Rate (MW)	SCDC DOPF tanpa <i>ramp rate</i> (MW)			
		Jam 1		Jam 2	
		1	2	1	2
1	30	105.36	51.40	101.84	43.36
2	40	158.70	106.44	154.14	105.83
3	35	110.94	217.16	107.77	214.56

Tabel 4.10 Selisih Pembangkitan Tanpa Batasan *Ramp Rate*

Unit Pembangkit	Ramp Rate (MW)	SCDC OPF tanpa <i>ramp rate</i> (MW)		
		Jam 1	Jam 2	Kondisi 1
		1 → 2	1 → 2	Jam (1 → 2)
1	30	53.96	58.48	3.52
2	40	52.26	48.32	4.56
3	35	106.22	106.79	3.16

Tabel 4.11 Daya Pembangkitan Dengan Batasan *Ramp Rate*

Unit Pembangkit	Ramp Rate	SCDC DOPF dengan <i>ramp rate</i>			
		Jam 1		Jam 2	
		1	2	1	2
1	30	105.36	114.72	101.84	109.08
2	40	158.70	122.18	154.14	120.88
3	35	110.94	138.10	107.77	133.79

Tabel 4.12 Selisih Pembangkitan Dengan Batasan *Ramp Rate*

Unit Pembangkit	Ramp Rate (MW)	SCDC DOPF tanpa <i>ramp rate</i> (MW)		
		Jam 1	Jam 2	Kondisi 1
		1 → 2	1 → 2	Jam (1 → 2)
1	30	9.36	7.25	3.52
2	40	36.52	33.26	4.56
3	35	27.16	26.01	3.16

4.2.3.2 Analisa Validasi Tahap 3

Dari hasil simulasi dapat diketahui pada saat pembangkitan tanpa menggunakan batasan *ramp rate* terdapat pelanggaran yang terjadi pada setiap unit pembangkit saat terjadi kontingensi, hal tersebut dapat dilihat pada tabel 4.10. Sedangkan pada saat pembangkitan menggunakan batasan *ramp rate* tidak terjadi pelanggaran baik saat terjadi kontingensi maupun terjadi perubahan beban, sesuai pada tabel 4.12. Dari hal tersebut dapat disimpulkan bahwa *quadratic programming* yang dibuat mampu untuk melakukan perhitungan *optimal power flow* arus searah dengan

memperhitungkan batasan *ramp rate* baik dalam saat terjadi kontingensi dan juga perubahan beban dengan akurat.

4.2.4 Validasi Tahap 4

Validasi tahap 4 adalah validasi terhadap kerja dari energy storage pada sistem. Pada tahap ini melihat apakah energy storage bekerja dalam batasan operasi dari energy storage tersebut. Validasi ini bertujuan untuk mengetahui apakah quadratic programming yang akan digunakan untuk perhitungan optimal power flow arus searah menghasilkan perhitungan daya keluaran dari masing-masing unit energy storage tanpa melewati batasan operasi atau SOC dari energy storage. Pengujian dilakukan pada kondisi normal dengan menggunakan data profil beban 1 pada gambar 1 selama 24 jam dengan 2 macam batas SOC.

4.2.4.1 Simulasi Validasi Tahap 4

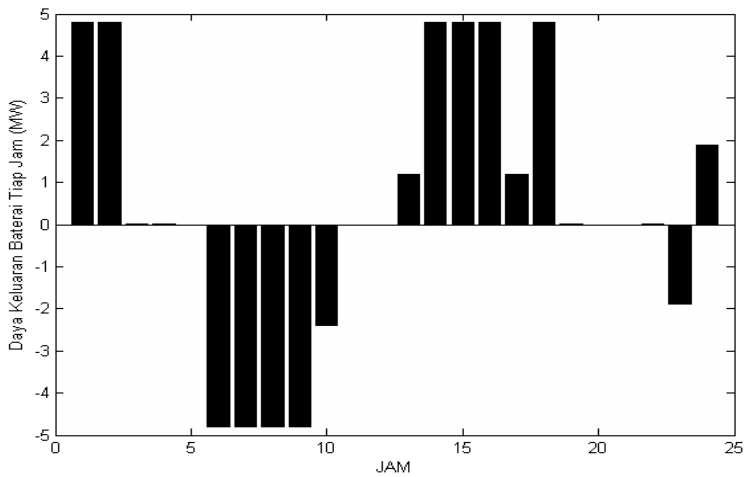
Data *Energy storage* dapat dilihat pada tabel 4.13 dan tabel 4.14.. Hasil simulasi sistem 9 bus dapat dilihat pada gambar 4.2 hingga gambar 4.5. Untuk daya dari pembangkit tiap jamnya dapat dilihat pada lampiran. Simulasi dilakukan dua kali dengan batas SOC baterai sesuai pada tabel 4.13 dan tabel 4.14 untuk melihat kerja dari batasan SOC terhadap daya keluaran baterai pada sistem, serta melihat apakah batasan SOC telah bekerja .

Tabel 4.13 Data *Energy Storage* (1)

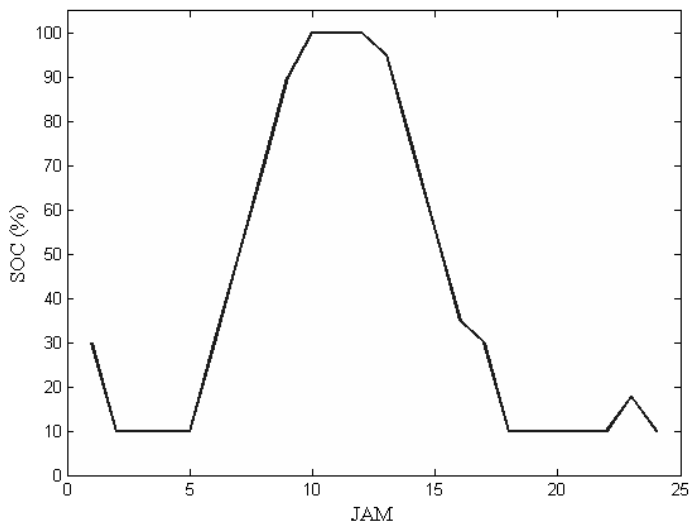
Baterai	Kapasitas (MW)	SOC Awal	SOC _{min}	SOC _{max}
B9	24	50%	10%	100%

Tabel 4.14 Data *Energy Storage* (2)

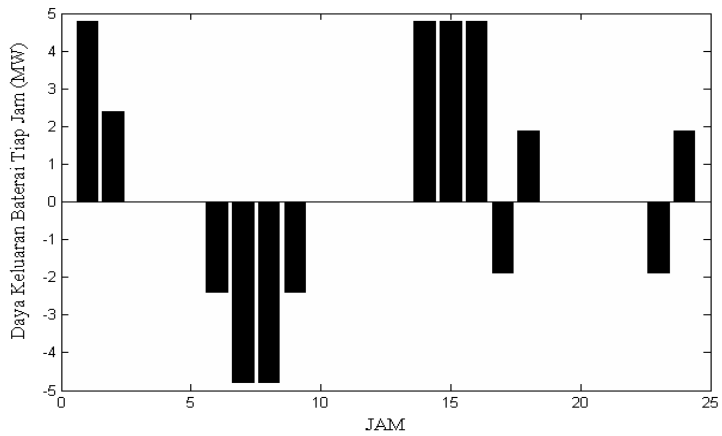
Baterai	Kapasitas (MW)	SOC Awal	SOC _{min}	SOC _{max}
B9	24	50%	20%	80%



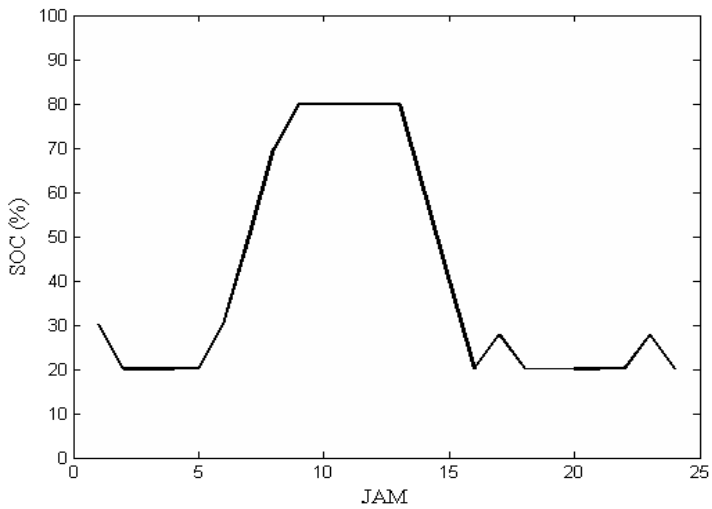
Gambar 4.3 Data Keluaran *Energy Storage* (1) Tiap Jam



Gambar 4.4 SOC *Energy Storage* (%)



Gambar 4.5 Daya Keluaran *Energy Storage* (2) Tiap Jam



Gambar 4.6 SOC (%) *Energy Storage* (2)

4.2.4.2 Analisa Validasi Tahap 4

Dari hasil simulasi dapat dilihat bagaimana cara kerja dari energy storage. Energy storage cenderung melakukan charging pada kondisi beban off peak dan melakukan discharging pada kondisi beban on peak sesuai pada gambar 4.3 dan gambar 4.5. Dari gambar tersebut dapat terlihat bahwa perbedaan batas SOC_{min} dan SOC_{max} dapat mempengaruhi kerja dari baterai *energy storage* tiap jamnya. Selain itu dari hasil simulasi dapat terlihat bahwa kerja energy storage tidak melanggar batas operasinya, yaitu masih dalam batas SOC_{min} dan SOC_{max} , SOC baterai energy storage tidak pernah kurang dari batas minimum SOC_{min} maupun lebih dari batas maksimum SOC_{max} dari masing-masing percobaan. Dengan pola operasi seperti ini, penggunaan baterai energy storage selalu berada dalam batas minimal dan maksimal. Maka dapat disimpulkan bahwa quadratic programming yang dibuat mampu untuk melakukan perhitungan *optimal power flow* arus searah dengan adanya *energy storage*.

4.3 Sistem 30 Bus

Sistem 30 Bus terdiri dari enam pembangkit *thermal* yang memiliki spesifikasi *ramp rate*, kapasitas maksimal pembangkit dan juga koefisien biaya pembangkit sesuai pada tabel 4.15. Pembangkit-pembangkit tersebut merupakan sumber utama dalam menyuplai beban. Selain pembangkit terdapat tambahan *battery energy storage* yang akan ditambahkan pada sistem untuk melihat pengaruhnya terhadap pembangkitan. *Battery energy storage* dipilih karena kemampuan yang dapat melakukan *charging* dan *discharging* tanpa ada batasan *ramp rate* seperti pada pembangkit *thermal*, sehingga diharapkan dapat membantu *ramp rate* pembangkit, khususnya pada saat terjadi kontingensi.

Pada sistem ini *battery energy storage* yang akan ditambahkan berjumlah lima unit dan diletakan secara tersebar pada sistem seperti pada gambar 4.7. Penempatan lokasi dari *energy storage* ini tidak dioptimasi, peletakkannya disesuaikan seperti pada [11]. Kapasitas dari *battery energy storage* yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.16.

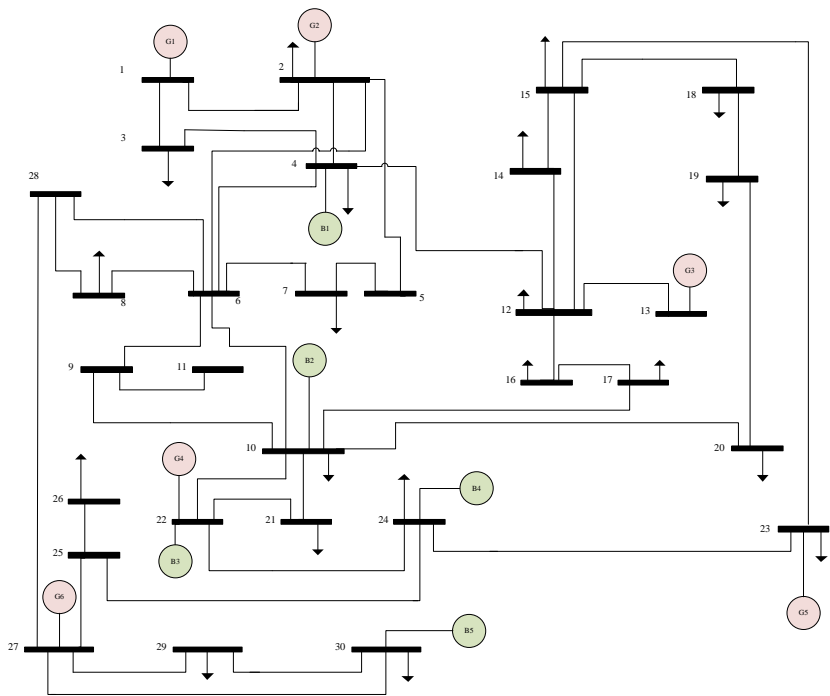
Tabel 4.15 Data Unit Pembangkit Sistem 30 Bus

Unit	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Bus	1	2	13	22	23	27
P max	80	80	40	50	30	55
P min	0	0	0	0	0	0
Ramp Rate	20	20	5	5	5	5
A (\$/Mw ² h)	0.02	0.0175	0.025	0.0625	0.025	0.00834
B (\$/Mwh)	2	1.75	3	1	3	3.25

Dari tabel 4.16 dapat dilihat spesifikasi dari *battery energy storage*, seperti kondisi awal *energy storage* atau SOC awal, SOC_{min}, dan SOC_{max} yang merupakan batas kerja dari *energy storage*. SOC dari masing-masing baterai adalah sama, namun untuk kapasitasnya berbeda antara setiap *energy storage*. Sama halnya dengan peletakan dari *energy storage*, *sizing* dari *energy storage* tersebut tidak dioptimasi, ukuran kapasitasnya mengikuti data pada [11].

Tabel 4.16 Data Energy Storage Pada Sistem 30 Bus

Baterai	B1	B2	B3	B4	B5
Bus	4	10	22	24	30
Kapasitas (MWh)	30	40	20	25	35
SOC Awal (%)	50	50	50	50	50
SOC _{min} (%)	10	10	10	10	10
SOC _{max} (%)	100	100	100	100	100
P _{charging max} (MW)	6	8	4	5	7
P _{discharging max} (MW)	3	4	2	2.5	3.5



Gambar 4.7 Sistem 30 Bus

Gambar 4.7 menunjukkan gambaran dari sistem 30 bus, dimana dapat terlihat terdapat enam pembangkit yang tersebar pada sistem, pada bus-bus yang sesuai pada tabel 4.15. Selain pembangkit dapat terlihat letak dari baterai *energy storage* seperti pada tabel 4.16. Dari gambar tersebut dapat terlihat dimana *energy storage* diletakan pada bus-bus yang terdapat beban, dan bus yang terdapat pembangkit. Dari gambar tersebut juga terlihat peletakan dari beban-beban. Data lengkap dari beban dapat dilihat pada tabel 4.17.

Tabel 4.17 Data Beban Sistem 30 Bus

Bus	Beban (MW)	Bus	Beban (MW)
1	0	16	4.2
2	26.04	17	10.8
3	2.88	18	3.84
4	9.12	19	11.4
5	0	20	2.64
6	0	21	21
7	27.36	22	0
8	36	23	3.84
9	0	24	10.44
10	6.96	25	0
11	0	26	4.2
12	13.44	27	0
13	0	28	0
14	7.44	29	2.88
15	9.84	30	12.72

Selain beban dan pembangkit yang terdapat pada sistem, terdapat saluran-saluran yang mengalirkan daya yang dihasilkan pembangkit hingga ke beban. Seolah-olah saluran menghubungkan pembangkit dengan beban. Setiap saluran pada sistem memiliki kapasitas dan impedansi yang berbeda-beda. Dari tabel 4.18 dapat dilihat data kapasitas saluran-saluran yang terdapat pada sistem. Kapasitas saluran tersebut menunjukkan kemampuan maksimal saluran dalam mengalirkan daya dari pembangkit-pembangkit menuju beban. Bila saluran mengalirkan daya melebihi kapasitasnya, maka hal tersebut telah melanggar batas maksimal dari saluran tersebut. Karena hal tersebut, pembangkit harus dapat membangkitkan daya yang sesuai agar tidak melanggar kapasitas saluran tersebut.

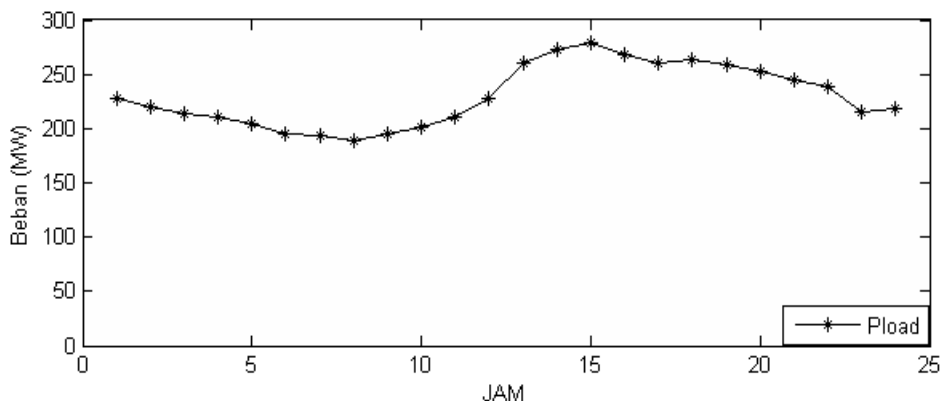
Tabel 4.18 Data Saluran Sistem 30 Bus

Saluran	Kapasitas (MW)	Saluran	Kapasitas (MW)
1-2	140	15-18	26
1-3	140	18-19	26
2-4	75	19-20	42
3-4	140	10-20	42
2-5	140	10-17	42
2-6	75	10-21	42
4-6	90	10-22	42
5-7	80	21-22	42
6-7	140	15-23	26
6-8	42	22-24	26
6-9	75	23-24	26
6-10	42	24-25	26
9-11	75	25-26	26
9-10	75	25-27	26
4-12	75	28-27	75
12-13	75	27-29	26
12-14	42	27-30	26
12-15	42	29-30	26
12-16	42	8-28	42
14-15	26	6-28	42
16-17	26		

4.3.1 Simulasi Sistem 30 Bus

Simulasi Sistem 30 Bus akan dilakukan beberapa pengujian untuk melihat pengaruh kontingensi dan penambahan *energy storage* kedalam sistem. Pengujian pertama pada sistem 30 Bus adalah melihat pengaruh

adanya pertimbangan kondisi kontingensi terhadap pembangkitan pada kondisi normal, serta melihat pengaruh *energy storage* ke dalam sistem dalam kondisi normal selama 24 jam. Profil Beban yang digunakan dapat dilihat pada gambar 4.8. Pengujian kedua yang dilakukan adalah melihat apakah kondisi kontingensi telah memenuhi batasan-batasan operasi, serta melihat pengaruh *energy storage* terhadap dampak dari kontingensi tersebut.

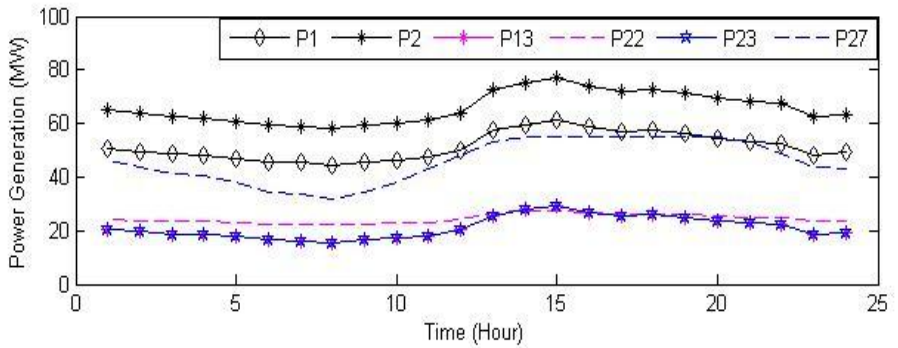


Gambar 4.8 Profil Beban Sistem 30 Bus

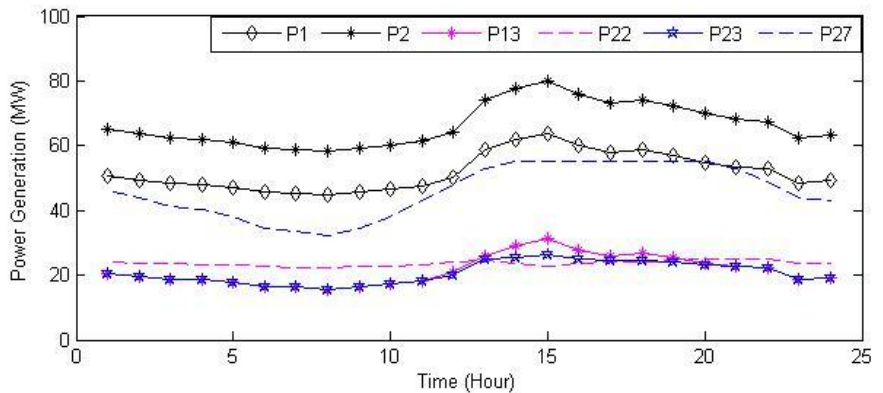
4.3.2 Pengujian Pertama

Pengujian pertama dilakukan untuk melihat pengaruh adanya *energy storage* terhadap biaya pembangkitan pada sistem. Pengujian dilakukan selama 24 jam pada kondisi normal.

- Kasus 1 : Simulasi OPF tanpa *energy storage*
- Kasus 2 : Simulasi SCOPF mempertimbangkan kontingensi saluran 21-22 tanpa *energy storage*
- Kasus 3 : Simulasi OPF dengan *energy storage*
- Kasus 4 : Simulasi SCOPF mempertimbangkan kontingensi saluran 21-22 dengan *energy storage*

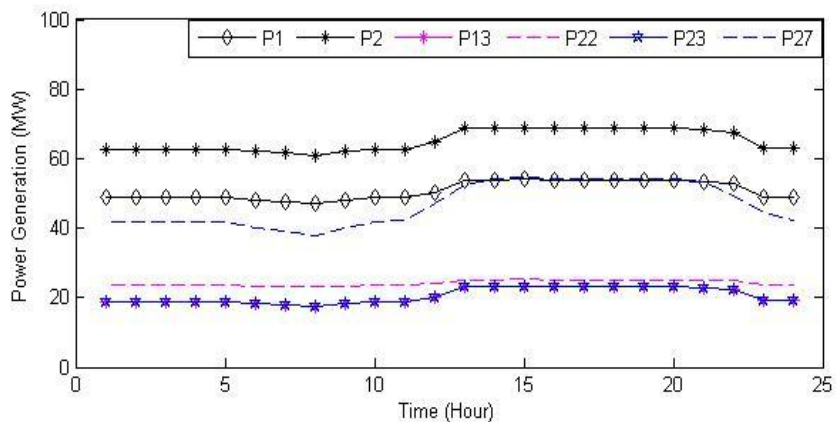


Gambar 4.9 Daya Pembangkitan Kasus 1 OPF Tanpa *Energy Storage*

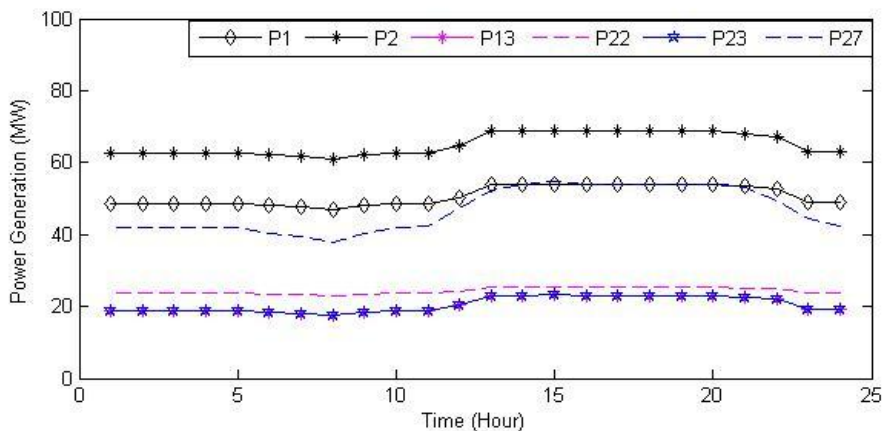


Gambar 4.10 Daya Pembangkitan Kasus 2 SCOPF tanpa *Energy Storage*

Gambar 4.9 dan 4.10, menunjukkan grafik daya pembangkitan OPF tanpa adanya pertimbangan kondisi kontingensi dan SCOPF yang terdapat pertimbangan kondisi kontingensi, daya pembangkitan ini dilihat pada kondisi normal selama 24 jam.



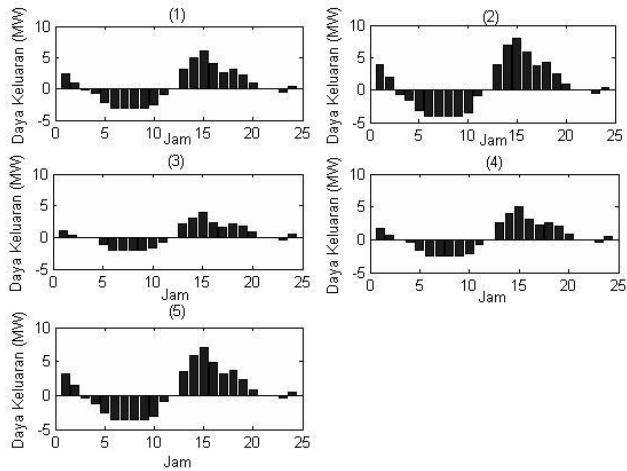
Gambar 4.11 Daya Pembangkitan Kasus 3 OPF dengan *Energy Storage*



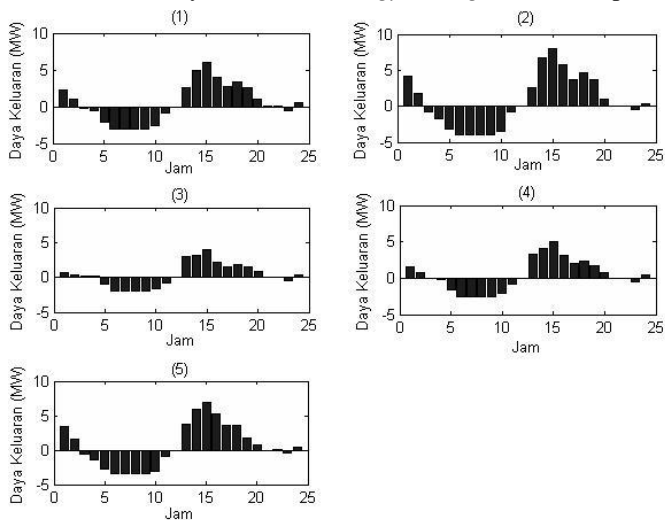
Gambar 4.12 Daya Pembangkitan Kasus 4 SCOPF dengan *Energy Storage*

Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan grafik pembangkitan OPF dan juga SCOPF, namun pada saat terdapat *energy storage* pada sistem.

Data pembangkitan pembangkit dan baterai *energy storage* selama 24 jam untuk kasus 2 dan kasus 4 dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4.13 Daya Keluaran *Energy Storage* (1)-(5) Tiap Jam Kasus 3



Gambar 4.14 Daya Keluaran *Energy Storage* (1)-(5) Tiap Jam Kasus 4

Pada gambar 4.13 dan 4.14 menunjukkan daya keluaran dari kasus 3 yaitu OPF dengan adanya *energy storage*, serta kasus 4 yaitu SCOPF dengan *energy storage*. Pada tabel 4.19 dapat terlihat perbedaan daya keluaran dari beberapa *energy storage* antara kasus 3 dan kasus 4. Biaya pembangkitan yang dihasilkan dari masing-masing kasus, dapat dilihat pada tabel 4.20.

Tabel 4.19 Perbedaan Daya Keluaran Kasus 3 dan Kasus 4

UNIT	JAM					
	13		14		15	
	Daya Keluaran (MW)		Daya Keluaran (MW)		Daya Keluaran (MW)	
	Kasus 3	Kasus 4	Kasus 3	Kasus 4	Kasus 3	Kasus 4
G1	53.78	53.78	53.78	53.78	54.03	54.03
G2	68.6	68.6	68.6	68.6	68.89	68.89
B1	3.06	2.55	4.94	4.85	6	6
B2	3.94	2.59	6.85	6.71	8	8

Tabel 4.20 Data Biaya Pembangkitan Pengujian Pertama

Kasus	Biaya(\$)
1	17467
2	17474
3	17184
4	17184

4.3.3 Analisa Pengujian Pertama

Dari hasil pengujian pertama dapat terlihat adanya pertimbangan kondisi kontingensi (SCOPF) mengakibatkan perbedaan pembangkitan pada kondisi normal antara OPF dengan SCOPF. Dapat dilihat pada gambar 4.9 dan 4.10 grafik pembangkitan OPF dengan SCOPF, terdapat perbedaan pembangkitan pada saat kondisi beban puncak. Perbedaan pembangkitan tersebut terjadi karena adanya pertimbangan kondisi kontingensi. Pembangkitan pada kondisi normal harus menyesuaikan

agar bila terjadi kontingensi, *dispatch* ulang yang harus dilakukan pembangkit dapat memenuhi batasan-batasan operasi, seperti *ramp rate*, dan kapasitas saluran. Hal inilah yang menyebabkan adanya perbedaan pembangkitan antara OPF yang tidak mempertimbangkan adanya kondisi kontingensi, dengan SCOPF yang mempertimbangkan adanya kondisi kontingensi. Perbedaan pembangkitan tersebut mengakibatkan perbedaan biaya pembangkitan antara OPF dan SCOPF. Dari tabel 4.20, adanya pertimbangan kontingensi (SCOPF) menghasilkan biaya yang lebih mahal hingga 0.4% dibandingkan pada OPF yang tidak terdapat pertimbangan kondisi kontingensi.

Namun pada saat ada penambahan *battery energy storage* pada sistem, terjadi perbedaan pembangkitan dengan pada saat tidak terdapat *energy storage*. Pembangkit menghasilkan daya yang lebih konstan atau fluktuatif dari pembangkitan menjadi berkurang, khususnya pada kondisi beban puncak, dapat dilihat perbandingannya antara gambar 4.10 dengan gambar 4.12. Hal tersebut terjadi karena kemampuan dari *battery energy storage* yang dapat menyimpan dan mengeluarkan daya pada sistem tiap jam. Dapat dilihat pada gambar 4.13 dan gambar 4.14 bahwa *energy storage* melakukan *charging* pada kondisi beban rendah dan *discharging* pada saat kondisi beban puncak, sehingga pembangkitan berubah menjadi lebih konstan, khususnya pada saat kondisi beban puncak. Selain itu dapat dilihat pada gambar 4.11 dan gambar 4.12 bagaimana pembangkitan pada OPF dan SCOPF tidak terdapat perbedaan. Hal ini berbeda pada saat tidak terdapat *energy storage* dimana terdapat perbedaan antara OPF dengan SCOPF. Dari hal tersebut menunjukkan pengaruh *energy storage* terhadap sistem. Dengan kemampuan *energy storage* yang dapat menyimpan dan mengeluarkan daya tiap jam, *energy storage* dapat membantu *ramp rate* dari pembangkit. Pembangkit memiliki batasan *ramp rate* yang harus dipenuhi dalam membangkitkan daya, baik pada OPF dan khususnya pada SCOPF yang harus menyesuaikan dengan *dispatching* ulang pada kondisi kontingensi. Dengan adanya *energy storage* di sistem, penyesuaian pembangkitan pada kondisi normal SCOPF yang dibutuhkan untuk memastikan *dispatching* ulang pada kondisi normal, dapat dibantu atau digantikan oleh adanya *energy storage*. Hal tersebut mengakibatkan tidak terdapat perbedaan pembangkitan pembangkit *thermal* antara OPF yang tidak mempertimbangkan kondisi kontingensi dengan SCOPF yang mempertimbangkan kondisi kontingensi. Namun, terdapat perbedaan daya keluaran dari *energy storage* antara OPF dengan SCOPF, dapat

dilihat pada tabel 4.19, perbedaan tersebut terjadi karena adanya penyesuaian pada SCOPF untuk *dispatch* ulang pada kondisi kontingensi.

Perubahan pembangkitan pada sistem akibat adanya *energy storage*, juga mempengaruhi biaya yang dihasilkan. Dari tabel 4.20, dapat dilihat bahwa sistem yang terdapat *energy storage* menghasilkan biaya pembangkitan yang lebih murah hingga 1.6% dibandingkan pada saat tidak *energy storage* selama masa operasi 24 jam. Hal ini terjadi akibat perubahan pembangkitan, khususnya pada beban puncak, dimana pembangkitan pada beban puncak yang memiliki *marginal cost* yang mahal turun akibat adanya daya keluaran dari *energy storage* yang telah melakukan *charging* pada beban rendah yang memiliki *marginal cost* rendah. Hal ini sesuai pada gambar 4.13 dan gambar 4.14 yang menunjukkan bagaimana *charging* dan *discharging energy storage* tersebut.

4.3.4 Pengujian Kedua

Pengujian kedua adalah menguji bagaimana pengaruh kontingensi terhadap sistem, serta apakah kondisi kontingensi telah memenuhi batasan operasi, dan pengaruh ada *energy storage* terhadap dampak kontingensi. Pengujian dilakukan dalam 4 kondisi dengan mengambil cuplikan level beban pada saat kondisi beban *on peak*. Saluran kontingensi yang dipilih adalah saluran 21-22 sesuai dengan tabel 4.2, yang merupakan saluran yang memberikan dampak terbesar kepada biaya operasi sistem.

- Kondisi 1 :Kondisi Normal tanpa ada *energy storage*
- Kondisi 2 :Kondisi kontingensi pada saluran 21-22 tanpa ada *energy storage*
- Kondisi 3 :Kondisi normal dengan penambahan *energy storage*
- Kondisi 4 :Kondisi kontingensi pada saluran 21-22 dengan penambahan *energy storage*

Kondisi *On Peak* dipilih pada saat T=15 dengan total beban sebesar 279.26 MW, kondisi dimana beban terbesar dan memiliki *marginal cost* yang tinggi. Pada saat kondisi ini, baterai *energy storage* dalam kondisi *discharging* sesuai pada gambar 4.14. Daya pembangkit setiap kondisi dapat dilihat pada tabel 4.21, sedangkan aliran daya saluran dapat dilihat pada tabel 4.22 hingga tabel 4.24.

Tabel 4.21 Daya Pembangkitan Pengujian Kedua Kondisi *On Peak*

Unit	Ramp Rate (MW)	Daya Keluaran (MW)				Keterangan
		Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4	
G1	20	63.87	80	54.02	71.97	Sesuai
G2	20	80	80	68.89	78.02	Sesuai
G3	5	31.09	29.96	23.22	26.57	Sesuai
G4	5	22.74	17.74	25.29	20.80	Sesuai
G5	5	26.56	21.56	23.22	20.79	Sesuai
G6	5	55	50	54.62	51.50	Sesuai
B1		-	-	6.00	4.79	
B2		-	-	8.00	7.14	
B3		-	-	4.00	-1.58	
B4		-	-	5.00	-1.48	
B5		-	-	7.00	0.74	

Tabel 4.22 Aliran Daya Saluran Kondisi Kontingensi (1)

Saluran	Kapasitas Saluran (MW)	Daya Yang Mengalir Pada Saluran (MW)	
		Kondisi 2	Kondisi 4
1-2	140	23.85	39.69
1-3	140	21.37	32.29
2-4	75	19.94	28.84
3-4	140	18.98	28.75
2-5	140	15.06	22.28
2-6	75	23.37	34.55
4-6	90	20.45	32.90
5-7	80	15.06	22.28
6-7	140	7.65	11.37

Tabel 4.23 Aliran Daya Saluran Kondisi Kontingensi (2)

Saluran	Kapasitas Saluran (MW)	Daya Yang Mengalir Pada Saluran (MW)	
		Kondisi 2	Kondisi 4
6-8	42	24.33	35.79
6-9	75	8.99	15.74
6-10	42	5.14	8.99
9-11	75	0	0.00
9-10	75	8.99	15.74
4-12	75	10.9	18.26
12-13	75	-17.06	-26.57
12-14	42	4.61	7.43
12-15	42	6.83	12.23
12-16	42	5.36	8.64
14-15	26	-1.41	-1.72
16-17	26	5.30	3.48
15-18	26	11.54	10.41
18-19	26	6.82	5.69
19-20	42	-7.20	-8.33
10-20	42	10.45	11.58
10-17	42	7.99	9.81
10-21	42	4.83	5.08
10-22	42	-3.35	-3.16
21-22	21	-21.00	-20.75
15-23	26	-11.72	-12.00
22-24	26	-6.60	-4.69
23-24	26	5.11	4.07
24-25	26	-14.33	-14.95
25-26	26	5.17	5.17

Tabel 4.24 Aliran Daya Saluran Kondisi Kontingensi (3)

Saluran	Kapasitas Saluran (MW)	Daya Yang Mengalir Pada Saluran (MW)	
		Kondisi 2	Kondisi 4
25-27	26	-19.50	-20.12
28-27	75	-11.31	-12.93
27-29	26	8.92	8.61
27-30	26	10.27	9.83
29-30	26	5.37	5.07
8-28	42	-8.17	-8.49
6-28	42	-3.15	-4.44

4.3.5 Analisa Pengujian Kedua

Pengujian kedua dilakukan untuk melihat pengaruh kontingensi dan melihat apakah kondisi kontingensi telah memenuhi batasan operasi yang ada, selain itu juga untuk melihat pengaruh *energy storage* terhadap dampak kontingensi tersebut. Dari tabel 4.20 dapat dilihat *dispatch* ulang yang dilakukan pembangkit untuk memenuhi batasan operasi pada kondisi kontingensi tidak ada yang melanggar batasan *ramp rate* pembangkit yang merupakan kopling penghubung kondisi normal dengan kondisi kontingensi. Namun, adanya *energy storage* pada sistem mengakibatkan *dispatch* ulang yang semula saat tidak terdapat *energy storage* memerlukan *ramp rate* hingga kapasitas maksimalnya menjadi berkurang dari kapasitas maksimal. Dengan kata lain, adanya *energy storage* pada sistem membantu *ramp rate* dari pembangkit-pembangkit pada sistem. Dapat dilihat pada tabel 4.20, pembangkit G5 yang semula pada saat tidak terdapat *energy storage* memerlukan *ramp rate* dengan kapasitas maksimal, dapat berkurang hingga 40 % saat di sistem terdapat *energy storage*. Hal ini juga menjadi salah satu alasan pada pengujian pertama, gambar 4.11 dan gambar 4.12 menghasilkan pembangkitan yang sama, karena yang semula tanpa *energy storage* membutuhkan *dispatch* ulang hingga kapasitas maksimalnya yang membuat diperlukan penyesuaian pembangkitan pada kondisi normal pada gambar 4.10, saat

terdapat *energy storage* pembangkitan pembangkit menjadi lebih fleksibel karena kemampuan *energy storage* yang dapat membantu *ramp rate* dari pembangkit tersebut.

Selain dari *ramp rate* pembangkitan yang berubah dan turun dari kapasitas maksimalnya, dapat dilihat pada tabel 4.21 hingga tabel 4.23 bagaimana aliran daya saluran pada sistem, khususnya pada saluran 21-22 yang mengalami kontingensi. Saluran 21-22 mengalami kontingensi mengakibatkan perubahan kapasitas saluran yang semula adalah 41 MVA berubah menjadi 21 MVA, dengan impedansi saluran yang menjadi dua kali lipatnya. Dari tabel-tabel tersebut, dapat dilihat, saluran-saluran pada kondisi kontingensi tidak ada yang melanggar batasan saluran, khususnya pada saluran 21-22 yang terjadi kontingensi. Pada saat tidak terdapat *energy storage*, kondisi kontingensi saluran 21-22 dialiri daya hingga kapasitas maksimal. Namun, pada saat terdapat *energy storage* pada sistem, daya yang mengalir pada saluran 21-22 yang semula telah mencapai kapasitasnya turun hingga 1.2% dari daya yang mengalir semula. Hal ini menunjukkan ada *energy storage* yang tersebar pada sistem, dapat menurunkan daya yang mengalir pada saluran yang mengalami kontingensi, sehingga tidak ada saluran yang mencapai kapasitas maksimal pada kondisi kontingensi.

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisa, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. *Quadratic Programming* dapat digunakan untuk penyelesaian optimasi baik beban statis ataupun beban dinamis tanpa melanggar batasan operasi, meskipun sistem mengalami kontingensi.
2. Akibat adanya pertimbangan kondisi kontingensi, biaya pembangkitan pada SCOPF menghasilkan biaya yang lebih mahal hingga 0.4% dibandingkan OPF.
3. *Energy storage* bekerja berdasarkan batasan SOC_{min} dan SOC_{max} , serta kondisi mula baterai.
4. *Energy storage* yang tersebar pada sistem dapat membantu menurunkan biaya pembangkitan selama 24 jam hingga 1.6% pada sistem 30 Bus, termasuk pada kondisi kontingensi.
5. *Energy storage* melakukan *charging* pada kondisi beban rendah yang memiliki *marginal cost* rendah dan *discharging* pada kondisi beban puncak yang memiliki *marginal cost* tinggi. Sehingga dapat meratakan beban puncak.
6. Dengan adanya *energy storage* di sistem, aliran daya pada kondisi kontingensi pada saluran yang mengalami kontingensi dapat turun hingga 1.2% dibandingkan saat tidak terdapat *energy storage*.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini kedepan adalah sebagai berikut:

1. Program dapat dikembangkan menjadi *AC power flow* sehingga semakin mendekati keadaan *real*.
2. Efisiensi dan pengaruh umur baterai dapat ditambahkan pada pemodelan baterai.
3. Untuk penelitian selanjutnya peletakan dan juga ukuran *energy storage* dapat dioptimasi, sehingga didapatkan pengaruh yang lebih maksimal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Adji, *Gambaran Umum Pengelolaan Sistem Jawa Bali*, Jakarta: Ekspose Sekuriti Sistem Jawa Bali, 2005.
- [2] B. F. W. Allen J. Wood, *Power Generation, Operation, and Control*, America: John Willey & Sons Inc., 1996.
- [3] Nursidi, *Dynamic Optimal Power Flow Arus Searah Menggunakan Quadratic Programming*, Tugas Akhir. Jurusan Teknik Elektro. Falkutas Teknologi Industri. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Juni 2013.
- [4] R. M. Rony Seto Wibowo, "Quadratic Programming Approach for Security Constrained Optimal Power Flow," in *International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, 2015.
- [5] R. P. Devon Manz, "Look Before You Leap: The Role of Energy Storage in the Grid," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 75-84, 2012.
- [6] H. Saadat, *Power System Analysis 2nd Edition*, McGrawHill, 1999.
- [7] O. Penangsang, *Analisa Aliran Daya*, ITS Press Surabaya, 2012.
- [8] T. P. Rony Seto, "Security Constrained Optimal Power Flow Incorporating Preventive and Corrective Control," in *Electrical Power, Electronics, Communications, Control and Informatics Seminar (EECCIS)*, 2014.
- [9] M. Osman, "A solution to the optimal power flow using genetic algorithm," *App. Math. Comput.*, vol. 155, pp. 391-405, 2004.
- [10] N. L. N. Rony Seto, "Dynamic Optimal Power Flow with Geothermal Power Plant Under Take or Pay Energy Contract," in *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (iSITIA)*, Surabaya, 2015.
- [11] Y. Zhang, "Day-Ahead Smart Grid Cooperative Distributed Energy Scheduling With Renewable and Storage Integration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1739 - 1748, 2016.

- [12] Y. D. Wen, "Enhanced Security Constrained OPF With Distributed Battery Energy Storage," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 30, 2015.
- [13] M. A. J.T. Alt, "Assessment of Utility Side Cost Saving From Savings from Battery Energy Storage," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 12, no. 3, pp. 1112-1120, 1997.

LAMPIRAN

1. Daya keluaran pembangkit dan baterai pada simulasi 9 bus untuk data *energy storage* (1).

Jam	Daya Keluaran (MW)			
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	B9
1	103.9	156.8	109.6	4.80
2	100.3	152.2	106.4	4.80
3	98.3	149.6	104.6	0.00
4	97.1	148.1	103.6	0.00
5	93.6	143.5	100.4	0.00
6	90.4	139.4	97.5	-4.80
7	89.2	137.8	96.5	-4.80
8	86.9	134.8	94.4	-4.80
9	90.4	139.4	97.5	-4.80
10	93.2	143.0	100.0	-2.40
11	97.1	148.1	103.6	0.00
12	105.4	158.7	110.9	0.00
13	131.0	165.0	134.0	1.20
14	139.0	165.0	141.2	4.80
15	145.0	165.0	146.5	4.80
16	135.1	165.0	137.6	4.80
17	131.0	165.0	134.0	1.20
18	131.1	165.0	134.1	4.80
19	129.7	165.0	132.8	0.00
20	123.8	165.0	127.5	0.00
21	117.8	165.0	122.2	0.00
22	111.9	165.0	116.8	0.00
23	100.1	151.9	106.2	-1.88
24	100.1	151.9	106.2	1.88

2. Daya keluaran pembangkit dan baterai pada simulasi 9 bus untuk *energy storage*(2)

Jam	Daya Keluaran (MW)			
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	B9
1	103.86	156.76	109.59	4.80
2	101.08	153.17	107.10	2.40
3	98.31	149.58	104.61	0.00
4	97.14	148.06	103.55	0.00
5	93.61	143.50	100.39	0.00
6	89.67	138.39	96.84	-2.40
7	89.24	137.84	96.46	-4.80
8	86.89	134.80	94.35	-4.80
9	89.67	138.39	96.84	-2.40
10	92.44	141.98	99.33	0.00
11	97.14	148.06	103.55	0.00
12	105.36	158.70	110.94	0.00
13	131.68	165.00	134.57	0.00
14	139.03	165.00	141.17	4.80
15	144.96	165.00	146.49	4.80
16	135.08	165.00	137.62	4.80
17	132.67	165.00	135.46	-1.88
18	132.67	165.00	135.46	1.88
19	129.70	165.00	132.80	0.00
20	123.78	165.00	127.47	0.00
21	117.85	165.00	122.15	0.00
22	111.92	165.00	116.83	0.00
23	100.07	151.86	106.19	-1.88
24	100.07	151.86	106.19	1.88

3. Daya keluaran pembangkit SCOPF tanpa *energy storage* pada sistem 30 Bus

Unit	Daya Keluaran (MW)				
	Jam 1	Jam 2	Jam 3	Jam 4	Jam 5
P1	50.59	49.53	48.48	48.13	47.07
P2	64.96	63.75	62.55	62.14	60.94
P13	20.47	19.63	18.78	18.50	17.66
P22	24.19	23.85	23.51	23.40	23.06
P23	20.47	19.63	18.78	18.50	17.66
P27	46.37	43.84	41.31	40.47	37.94
Unit	Daya Keluaran (MW)				
	Jam 6	Jam 7	Jam 8	Jam 9	Jam 10
P1	45.67	45.32	44.61	45.67	46.52
P2	59.33	58.93	58.13	59.33	60.31
P13	16.53	16.25	15.69	16.53	17.22
P22	22.61	22.50	22.28	22.61	22.89
P23	16.53	16.25	15.69	16.53	17.22
P27	34.57	33.73	32.05	34.57	37.90
Unit	Daya Keluaran (MW)				
	Jam 11	Jam 12	Jam 13	Jam 14	Jam 15
P1	47.53	50.00	58.56	61.74	63.87
P2	61.46	64.29	74.07	77.71	80.00
P13	18.02	20.80	25.80	28.85	31.09
P22	23.21	24.00	24.73	23.51	22.74
P23	18.02	20.04	25.03	25.64	26.56
P27	42.90	47.90	52.90	55.00	55.00

Unit	Daya Keluaran (MW)				
	Jam 16	Jam 17	Jam 18	Jam 19	Jam 20
P1	60.23	57.95	58.71	57.19	54.91
P2	75.97	73.37	74.24	72.50	69.90
P13	27.74	26.07	26.63	25.52	23.85
P22	23.83	24.32	24.16	24.48	24.96
P23	25.14	24.39	24.64	24.14	23.39
P27	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00

Unit	Daya Keluaran (MW)			
	Jam 21	Jam 22	Jam 23	Jam 24
P1	53.40	52.77	48.41	49.18
P2	68.17	67.45	62.47	63.35
P13	22.72	22.21	18.73	19.34
P22	25.09	24.88	23.49	23.74
P23	22.72	22.21	18.73	19.34
P27	53.11	48.87	43.87	43.00

4. Daya keluaran pembangkit dengan *energy storage* pada sistem 30 Bus

Unit	Daya Keluaran (MW)				
	Jam 1	Jam 2	Jam 3	Jam 4	Jam 5
P1	48.70	48.70	48.70	48.70	48.70
P2	62.80	62.80	62.80	62.80	62.80
B4	2.29	1.00	-0.26	-0.62	-2.09
B10	4.10	1.81	-0.78	-1.72	-3.14
P13	18.96	18.96	18.96	18.96	18.96
B22	0.77	0.35	0.12	0.22	-1.03
P22	23.58	23.58	23.58	23.58	23.58
P23	18.96	18.96	18.96	18.96	18.96
B24	1.59	0.69	-0.02	-0.23	-1.59
P27	41.85	41.85	41.85	41.85	41.85
B30	3.43	1.53	-0.50	-1.35	-2.68
Unit	Daya Keluaran (MW)				
	Jam 6	Jam 7	Jam 8	Jam 9	Jam 10
P1	47.99	47.64	46.93	47.99	48.70
P2	61.99	61.59	60.78	61.99	62.80
B4	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-2.54
B10	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-3.51
P13	18.39	18.11	17.55	18.39	18.96
B22	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-1.62
P22	23.36	23.24	23.02	23.36	23.58
P23	18.39	18.11	17.55	18.39	18.96
B24	-2.50	-2.50	-2.50	-2.50	-2.08
P27	40.14	39.30	37.61	40.14	41.85
B30	-3.50	-3.50	-3.50	-3.50	-3.05

Unit	Daya Keluaran (MW)				
	Jam 11	Jam 12	Jam 13	Jam 14	Jam 15
P1	48.70	50.37	53.78	53.78	54.03
P2	62.80	64.71	68.60	68.60	68.89
B4	-0.78	0.00	2.55	4.85	6.00
B10	-0.78	0.00	2.59	6.71	8.00
P13	18.96	20.30	23.02	23.02	23.22
B22	-0.81	0.00	2.97	3.18	4.00
P22	23.58	24.12	25.21	25.21	25.29
P23	18.96	20.30	23.02	23.02	23.22
B24	-0.86	0.00	3.36	4.09	5.00
P27	42.24	47.24	52.24	54.02	54.62
B30	-0.87	0.00	3.76	5.98	7.00
Unit	Daya Keluaran (MW)				
	Jam 16	Jam 17	Jam 18	Jam 19	Jam 20
P1	53.78	53.78	53.78	53.78	53.78
P2	68.60	68.60	68.60	68.60	68.60
B4	3.98	2.78	3.31	2.54	0.99
B10	5.70	3.69	4.64	3.70	0.98
P13	23.02	23.02	23.02	23.02	23.02
B22	2.22	1.45	1.87	1.49	0.82
P22	25.21	25.21	25.21	25.21	25.21
P23	23.02	23.02	23.02	23.02	23.02
B24	3.17	2.03	2.40	1.65	0.82
P27	54.02	54.02	54.02	54.02	54.02
B30	5.19	3.50	3.50	1.81	0.75

Unit	Daya Keluaran (MW)			
	Jam 21	Jam 22	Jam 23	Jam 24
P1	53.40	52.67	48.84	48.84
P2	68.17	67.33	62.96	62.96
B4	0.00	0.00	-0.50	0.50
B10	0.00	0.00	-0.38	0.38
P13	22.72	22.13	19.08	19.08
B22	0.00	0.00	-0.43	0.43
P22	25.09	24.85	23.63	23.63
P23	22.72	22.13	19.08	19.08
B24	0.00	0.00	-0.45	0.45
P27	53.11	49.27	44.27	42.19
B30	0.00	0.00	-0.42	0.42

5. Aliran daya saluran 30 Bus pengujian kedua kondisi on peak
t=15

Saluran	Daya Yang Mengalir Pada Saluran (MW)				
	Kapasitas	Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4
1-2	140	23.06	23.85	29.57	39.69
1-3	140	21.56	21.37	24.46	32.29
2-4	75	20.46	19.94	21.82	28.84
3-4	140	19.17	18.98	20.91	28.75
2-5	140	15.27	15.06	18.48	22.28
2-6	75	23.84	23.37	26.12	34.55
4-6	90	20.3	20.45	24.81	32.9
5-7	80	15.27	15.06	18.48	22.28
6-7	140	7.44	7.65	15.17	11.37
6-8	42	24.38	24.33	34.03	35.79
6-9	75	9.15	8.99	8.41	15.74
6-10	42	5.23	5.14	4.81	8.99
9-11	75	0	0	0	0
9-10	75	9.15	8.99	8.41	15.74
4-12	75	11.76	10.9	12.71	18.26
12-13	75	-15.69	-17.06	-23.22	-26.57
12-14	42	4.59	4.61	6.05	7.43
12-15	42	6.73	6.83	7.32	12.23
12-16	42	4.98	5.36	6.04	8.64
14-15	26	-2.15	-1.41	-3.11	-1.72
16-17	26	4.83	5.3	0.87	3.48
15-18	26	11.74	11.54	9.48	10.41

Saluran	Daya Yang Mengalir Pada Saluran (MW)				
	Kapasitas	Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4
18-19	26	7.01	6.82	4.76	5.69
19-20	42	-7.01	-7.2	-9.26	-8.33
10-20	42	10.26	10.45	12.51	11.58
10-17	42	8.46	7.99	12.41	9.81
10-21	42	-1.21	4.83	-5.52	5.08
10-22	42	-4.17	-3.35	-6.75	-3.16
21-22	42 (21)	-27.04	-21	-31.35	-20.75
15-23	26	-15.31	-11.72	-17.37	-12
22-24	26	-8.46	-6.6	-8.81	-4.69
23-24	26	6.53	5.11	1.12	4.07
24-25	26	-14.78	-14.33	-15.53	-14.95
25-26	26	5.17	5.17	5.17	5.17
25-27	26	-19.94	-19.5	-20.7	-20.12
28-27	75	-15.87	-11.31	-21.73	-12.93
27-29	26	8.92	8.92	6.06	8.61
27-30	26	10.27	10.27	6.13	9.83
29-30	26	5.37	5.37	2.52	5.07
8-28	42	-9.08	-8.17	-10.25	-8.49
6-28	42	-6.79	-3.15	-11.48	-4.44

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Yoanes Bagus Nugraha Wigaswara adalah putra kedua dari pasangan Y. Kusno Wibowo dengan Y. M. Luh Putu Yigawati. Bagus yang merupakan nama sapaannya, lahir pada 27 Maret 1995 di Semarang. Lulusan SMA Gonzaga Jakarta pada tahun 2013. Pada tahun 2013 melanjutkan kuliah S1 ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, dengan jurusan Teknik Elektro. Konsentrasi bidang studi yang diambil adalah teknik sistem tenaga.

Penulis aktif dalam kegiatan kemahasiswaan seperti kepanitiaan, organisasi mahasiswa dan juga lomba-lomba. Selain itu penulis terdaftar sebagai asisten di laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik (B103). Ia juga pernah menjabat sebagai asisten kordinator di lab tersebut. Penulis dapat dihubungi melalui email: byoanes@gmail.com.